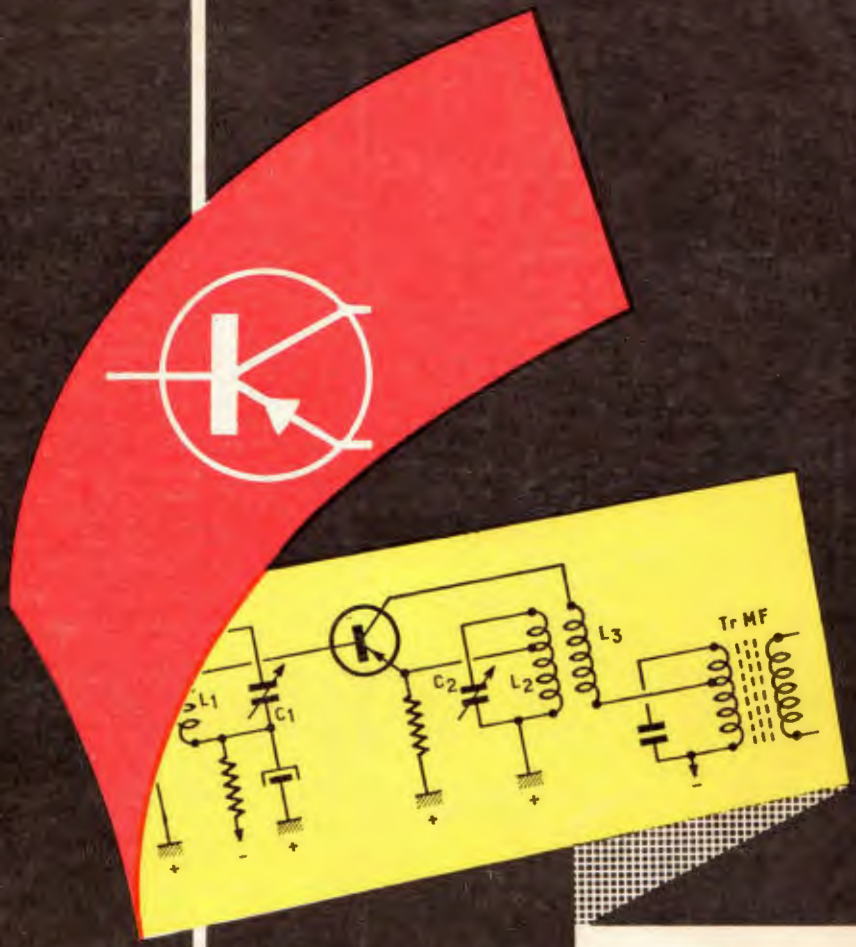
E. AISBERG



Le TRANSISTOR ?..

MAIS C'EST TRES SIMPLE !

Notions fondamentales

Caractéristiques essentielles

Technologie

Montages de base en radio-électricité

SOCIÉTÉ DES EDITIONS RADIO - PARIS

En moins de dix ans, le transistor — né en 1948 — a fait la conquête des principaux domaines de l'Electronique. Toute une nouvelle technique est ainsi apparue... obligeant chacun à s'adapter aux nouvelles notions et conceptions imposées par les triodes à cristal.

Et comme toute reconversion, celle-ci reste difficile, car le transistor pose des problèmes autrement plus ardus que le tube électronique. L'interdépendance de tous ses paramètres, la faible résistance d'entrée, l'action de la chaleur, autant d'obstacles sur le chemin conduisant à l'assimilation de cette nouvelle technique.

Voilà pourquoi l'auteur — qui a déjà contribué à la formation de centaines de milliers de techniciens avec ses deux ouvrages célèbres dans le monde entier : « La Radio?... Mais c'est très simple! » **et** « La Télévision?... Mais c'est très simple! » **— leur permettra d'acquérir aisément la maîtrise du domaine des transistors.**

Il existe, certes, d'excellents textes de haute technique consacrés aux transistors. Mais n'est-il pas plus sage de commencer par un livre dont le but est de faire comprendre l'essentiel de la masse des notions et montages de cette technique en pleine évolution?

Rédigé dans un style alerte, plaisant, présenté de façon particulièrement vivante, « Le Transistor?... Mais c'est très simple! », **explique tous les phénomènes physiques des transistors, sans faire appel aux mathématiques. De nombreuses figures facilitent l'assimilation de l'exposé. De même, des dessins maginaux, empreints d'humour, constituent encore, malgré leur légèreté apparente, une forme d'explications techniques non négligeable.**

Ce livre réussira certainement à distraire le lecteur tout en l'instruisant_

... Et chacun, après l'avoir lu, pensera qu'effectivement, quoi qu'on en dise, le transistor est quelque chose de très simple.

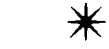
E. AISBERG
DIRECTEUR DE
"TOUTE LA RADIO"
ET DE
"TELEVISION"

LE TRANSISTOR ?..

Mais c'est très simple !

PRINCIPES PHYSIQUES DE BASE
CARACTÉRISTIQUES FONDAMENTALES
APPLICATIONS DANS DIVERS
MONTAGES RADIO-RÉCEPTEURS

Dessins marginaux de
POL FERJAC



SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO
9, rue Jacob - Paris 6e

PREFACE

Que nous étions donc tranquilles en suivant la lente et paisible évolution de la technique radio-électrique jusqu'à ce jour de 1948 où l'avènement du transistor vint tout bouleverser! Ce fut une révolution... En peu d'années, les dispositifs à semiconducteurs firent la conquête des principaux domaines de l'Electronique. Toute une nouvelle technique allait se former à côté de celle, désormais classique, familière aux « lampistes ». Et ceux-ci ont eu du mal à se convertir aux nouvelles notions et conceptions imposées par les triodes à cristal.

Quels sont les outils servant à une telle conversion?

Il existe nombre d'excellents ouvrages de haute technique consacrés aux transistors; mais leur lecture nécessite des connaissances poussées de mathématiques et de la physique des solides dont l'accès est plutôt malaisé. En revanche, rares sont les bons livres, de niveau moyen, destinés aux praticiens de la radio désireux de pénétrer dans le monde des transistors, comprendre les phénomènes physiques qui s'y déroulent et pouvoir analyser sans peine la composition des montages modernes utilisant ces « bêtes à trois pattes ».

Cependant, la nécessité de tels ouvrages d'initiation se fait sentir avec acuité. Les contacts quotidiens avec de nombreux professionnels et amateurs nous ont démontré à quel point, pour la plupart, ils méconnaissent la théorie élémentaire des transistors. Voilà pourquoi nous avons tenté de rédiger un livre s'adressant à ceux qui possèdent déjà des connaissances de base en matière de radio-électricité (ne serait-ce qu'au niveau de « La Radio?... Mais c'est très simple! ») et veulent, sans trop de difficulté, s'initier à la technique particulière des transistors.

La tâche n'était guère facile. Le transistor pose des problèmes autrement ardus que le tube électronique. L'interdépendance de tous ses paramètres, la faible résistance d'entrée, l'action de la chaleur, autant d'obstacles sur le chemin qui conduit vers la compréhension de la nouvelle technique.

Voilà pourquoi, à l'origine, ce livre devait être intitulé « Le Transistor?... Mais ce n'est pas si simple ». (Une phrase du premier paragraphe en donne, d'ailleurs, l'énoncé.) Mais au fur et à mesure que nous écrivions les causeries composant ce volume, nos deux personnages, Curiosus et Ignotus, sont parvenus

à nous convaincre que leur façon de voir les choses n'avait rien de complexe. Il était dès lors légitime d'adopter un titre semblable à ceux de nos livres consacrés à la radio et à la télévision.

Est-ce à dire que le contenu des pages qui suivent pourra être assimilé sans le moindre effort? Assurément pas. Le lecteur devra déployer la plus grande attention et n'avancer dans l'étude qu'après avoir bien appris les notions de base. Que l'humour et la légèreté des dessins marginaux ne créent pas dans son esprit une illusion de facilité excessive! Ces croquis aident à comprendre, complètent le texte et procurent une détente dont nous ne saurions sous-estimer la valeur didactique. Mais pour acquérir des connaissances, il faut travailler, travailler avec assiduité, avec application et — surtout — avec régularité.

Certains trouveront dans notre exposé des choses qu'ils connaissaient déjà telles que la construction de la droite de charge ou les conditions optima de transfert de puissance. Tant mieux pour eux! D'autres devront, en revanche, faire un réel effort d'imagination pour comprendre l'usage des courbes caractéristiques auquel nous faisons souvent appel.

Que l'on ne cherche pas ici la théorie complète et rigoureuse des transistors. Qu'on n'y cherche pas davantage des plans de réalisation d'appareils variés. Notre propos était de faire comprendre. De la masse des notions et des montages formant une technique en pleine évolution, nous nous sommes efforcé de dégager l'essentiel, laissant de côté ce qui semblait être éphémère.

Les deux personnages dont le vivant dialogue est consigné dans les pages qui suivent n'ont rien de docte ni de grave. Ils sont résolument de l'avis de Montesquieu qui affirmait que « la gravité est le bonheur des imbéciles ». Aussi, espérons-nous que le lecteur, en avançant dans l'étude de ces pages, aura le double plaisir de s'instruire en se distrayant. C'est la grâce que nous lui souhaitons.

E.A.

CE QU'IL FAUT SAVOIR avant de commencer l'étude de ce livre

SYMBOLES DES UNITÉS

m - mètre	W - watt	
g - gramme	F - farad	
s - seconde	H - henry	
V - volt	Hz - hertz	
A - ampère	(période	
Ω - ohm	par seconde)	

SYSTÈME DÉCIMAL

M - méga (1 000 000)
k - kilo (1 000)
m - milli (0,001)
μ - micro (0,000 001)
n - nano (0,000 000 001)
p - pico (0,000 000 000 001)

En plaçant le symbole du préfixe décimal avant celui de l'unité, on obtient divers multiples et sous-multiples parmi lesquels citons à titre d'exemple :

mm - millimètre	mV - millivolt	pF - picofarad
μs - microseconde	μV - microvolt	kHz - kilohertz
mA - milliampère	MΩ - mégohm	MHz - mégahertz
μA - microampère	μF - microfarad	mW - milliwatt

SENS DU COURANT

Le courant électrique est formé par le déplacement des électrons. Ceux-ci, dans le circuit extérieur, vont du négatif au positif. Tel est le sens du courant adopté tout au long des pages qui suivent. (C'est le contraire du sens conventionnel qui veut que le courant aille du positif au négatif.)

Quand le courant traverse une résistance, il y détermine une chute de tension. L'extrémité de la résistance constituant l'entrée du courant devient négative par rapport à sa sortie.

NOTATIONS ADOPTÉES

Au fur et à mesure que nous ferons connaissance avec différentes caractéristiques du transistor, nous utiliserons les notations suivantes :

I_e - courant de l'émetteur	r_e - résistance d'entrée
I_b - courant de base	r_s - résistance de sortie
I_c - courant de collecteur	α - amplif. de courant en B.C.
E_b - tension de base	β - amplif. de courant en E.C.
E_c - tension de collecteur	γ - amplif. de courant en C.C.

μ - taux de contre-réaction interne

Les tensions des sources seront désignées par U. Δ désignera toujours une très faible variation de la grandeur que cette lettre grecque (delta) précède.

Mais — rassurez-vous — point n'est besoin d'apprendre ces notations d'avance!

Et maintenant écoutons parler Curiosus et Ignotus...

LES PERSONNAGES

Curiosus, jeune professeur d'électronique, ayant jadis appris les bases de radio-électricité de son oncle Radiol; il est toujours prêt à satisfaire l'inépuisable curiosité de son ami...

... Ignotus, qui fut son premier élève. Leurs causeries sont relatées dans deux livres (« La Radio?... Mais c'est très simple! » et « La Télévision?... Mais c'est très simple! ») où l'on constate que, si le personnage manquait parfois de certaines connaissances élémentaires, il était, en revanche, doué d'une faculté d'assimilation peu commune. Actuellement **Ignotus** est employé comme agent technique dans une usine de récepteurs radio.

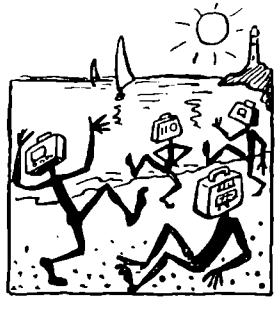
PREMIÈRE CAUSERIE

On ne peut pas comprendre aisément le fonctionnement des transistors sans avoir approfondi certaines notions de physique et de chimie concernant la composition et l'association des atomes. C'est à quoi nos deux amis s'emploient dans la conversation qu'on lira ci-dessous.

★ **SOMMAIRE : Semiconducteurs. - Fonctions et avantages du transistor. - Action de la chaleur sur les transistors. - Limites de fréquence et de puissance. - Molécules. - Atomes. - Protons, neutrons et électrons. - Répartition des électrons sur des couches. - Ionisation. - Nombre de valence. - Réseau cristallin.**

LA VIE DES ATOMES

Ignotus victime des transistors.



CURIOSUS. — Content de vous revoir, cher ami. Avez-vous passé de bonnes vacances?

IGNOTUS. — Non, hélas.

CUR. — Le temps fut-il inclément, le ciel couvert et la mer démontée?

IG. — Au contraire, nous bénéficiâmes d'un temps idéal. Mais il n'était pas possible de se reposer sur la plage, car de tous côtés les estivants faisaient hurler leurs postes à transistors. Sous les feux croisés des chanteuses sans voix et des airs de danse sauvages, mes nerfs étaient soumis à une rude épreuve. Et, de surcroît, désireux de

comprendre comment ces transistors parvenaient à faire tant de bruit, j'ai essayé de lire des livres qui devaient m'en révéler la théorie et les applications... Je n'y ai rien compris!

CUR. — Je conçois l'amertume que vous a causé cet échec. Mais que votre amour-propre n'en souffre pas : les transistors, croyez-moi, ce n'est pas si simple! En ouvrant le Congrès International des Transistors qui, en mai 1959, s'est tenu à Londres, lord HAILSHAM a dit : « Je ne pense pas que, même dans les pays les plus industrialisés, une personne sur dix mille soit capable d'expliquer ce qu'est un transistor ou même ce que sont les semiconducteurs. »

IG. — Cela me console d'autant plus que je crois pouvoir dire ce qu'est un semiconducteur.

CUR. — Bravo, Ignotus! Allez donc : faites étalage de vos connaissances.

Les bêtes à trois pattes.

IG. — Eh bien, un semiconducteur doit avoir une résistivité infiniment supérieure à celle des conducteurs, mais aussi bien inférieure à celle des isolants.

CUR. — C'est juste, encore que passablement vague. Disons, pour préciser qu'un semiconducteur tel que le germanium (qui est principalement employé pour la fabrication des transistors) a une résistivité 300 millions de fois supérieure à celle du cuivre. Mais elle est un million de millions de fois inférieure à celle du verre.

IG. — En somme, il est, dans l'échelle des résistivités, plus proche des conducteurs que des isolants?

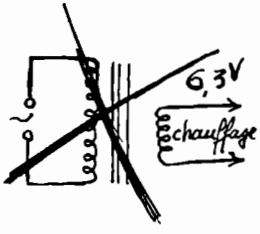
CUR. — Oui. Et c'est parce qu'il conduit les courants à sa façon, que le germanium permet de fabriquer les « bêtes à trois pattes ».

IG. — Qu'appelez-vous ainsi?

CUR. — C'est le nom que l'on peut donner aux transistors (ou « triodes à cristal »), car ils sont pourvus de trois fils de connexion.

IG. — En somme, le transistor, si j'ai bien compris, remplace le tube électronique. Peut-il en assumer toutes les fonctions? Et quels en sont les avantages?

CUR. — Me voilà noyé sous une pluie de questions!... Oui, mon cher Ignotus, comme un tube électronique, le transistor peut amplifier ou détecter des signaux; il est capable d'engendrer des oscillations électriques; et on peut le charger du changement de fréquence et de toutes les autres fonctions des tubes à vide. Quant aux avantages, il en possède de nombreux. Et pour commencer, *l'absence de chauffage*.



IG. — C'est magnifique! On n'a donc pas besoin d'une source de courant spéciale de chauffage, comme pour les lampes?

CUR. — Non. Et de ce fait, les transistors se mettent à fonctionner *instantanément*, dès qu'ils sont mis sous tension, alors que les tubes exigent une attente de plusieurs dizaines de secondes avant que leurs cathodes atteignent la température nécessaire à l'émission normale des électrons.

IG. — Je pense aussi que l'absence de chauffage doit déterminer un meilleur *rendement énergétique*. Car, dans les tubes à vide, une bonne partie de l'énergie procurée par les sources d'alimentation est perdue sous forme de chaleur.

CUR. — C'est exact. Les transistors ne connaissent pas ce déplorable gaspillage des watts qui s'en vont en inutiles calories et qui caractérise toutes les « lampes de radio ». Là où un tube électronique consomme facilement 2 ou 3 W, un transistor se contente d'une trentaine de

milliwatts, donc d'une *puissance mille fois plus faible*. Et à la place des quelque 200 V que demandent les tubes de réception, le transistor, lui, est parfaitement satisfait d'une tension de moins de 10 V.

IG. — En somme, une ou deux piles classiques pour lampes de poche devraient suffire pour satisfaire l'appétit modique d'un récepteur à transistors?

CUR. — Oui, c'est bien ainsi que sont alimentés les postes portatifs qui vous ont rendu l'existence impossible sur la plage.

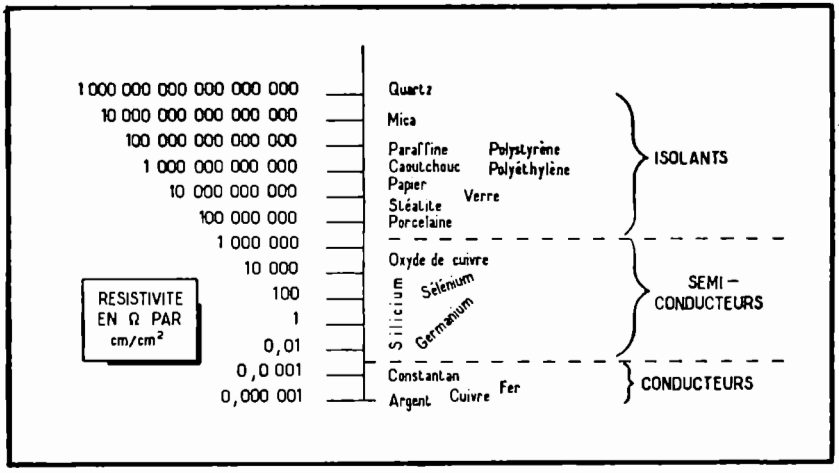


Fig. 1. — Répartition des principaux conducteurs, semiconducteurs et isolants, en fonction de leur résistivité. On notera que la résistivité des semiconducteurs varie dans de très larges proportions, en sorte que, sur notre échelle, ils occupent des plages plus ou moins larges.

IG. — Peut-on également penser que les transistors sont plus robustes et ont une existence plus longue que les tubes électroniques, puisqu'ils n'ont pas de fragile filament ni de cathode dont l'émission électronique finit par s'appauvrir?

CUR. — C'est exact. Le transistor se distingue et par sa robustesse (car il s'agit d'un morceau de cristal de germanium ou de silicium, pourvu de trois connexions et enfermé dans un boîtier), et par son faible poids et ses très petites dimensions.

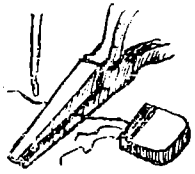
IG. — C'est magnifique! Rien que des avantages et pas de défauts!

Le revers de la médaille.

CUR. — Voilà bien le danger des jugements hâtifs! Hélas, le transistor a aussi certains défauts. Le plus grave est qu'il supporte très mal la chaleur. Au-delà de 55 °C, son rendement tombe assez rapidement; et, porté à plus de 85 °C, il ne retrouvera plus ses qualités initiales, une fois refroidi (1). C'est du moins le cas des transistors au germanium. Ceux au silicium supportent allègrement des températures bien plus élevées :

(1) Certains transistors de puissance supportent des températures atteignant 100 °C. On y parvient en y incorporant des doses relativement élevées d'impuretés.

150 °C ne leur font pas peur. Car dans le silicium, les électrons de la couche extérieure sont plus solidement liés au noyau, comme vous le verrez plus tard.



IG. — Je vous promets donc de ne jamais approcher mon fer à souder d'un transistor.

CUR. — Et vous ferez bien. D'ailleurs, pour effectuer des soudures sur les connexions des transistors, on doit intercepter les calories dégagées par la panne du fer, afin qu'elles n'atteignent pas le corps du transistor.

IG. — Et comment fait-on?

CUR. — Tout bonnement en serrant une portion du fil de connexion entre le transistor et le point de la soudure, dans les mâchoires d'une pince plate... D'ailleurs, les fabricants des transistors établissent les connexions en fil mauvais conducteur de chaleur (mais, heureusement, bon conducteur de courant!).

IG. — Y a-t-il d'autres reproches que vous puissiez formuler à l'encontre du transistor?

CUR. — Malheureusement, oui. C'est sa limitation en fréquence et en puissance. Il ne peut pas fonctionner à plus de quelques centaines de mégahertz...

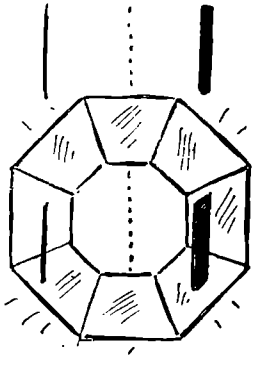
IG. — Ce n'est déjà pas si mal, si l'on songe que le mégahertz c'est un million de périodes par seconde.

CUR. — Et il ne peut pas non plus fonctionner à des puissances élevées, car la chaleur qui est alors dissipée dans le corps du transistor en compromet le rendement.

IG. — Pensez-vous que ce soient là des défauts prohibitifs?

CUR. — Assurément pas. Depuis qu'il a été inventé, en 1948, par trois physiciens américains, BARDEEN, BRATTAIN et SHOCKLEY (auxquels il a valu le prix Nobel), le transistor fut sans cesse amélioré. Et, d'ores et déjà, il remplace avantageusement le tube à vide dans la plupart de ses applications. Mais je ne pense pas que pour autant on renonce un jour complètement à l'emploi des tubes à vide.

Retour aux sources.



IG. — Maintenant que je ne suis plus assailli par le discordant ensemble des petits récepteurs de plage, j'ai plus que jamais envie de comprendre comment fonctionnent les transistors et de quelle manière on peut les utiliser.

CUR. — Chose curieuse : autant les circuits associés aux transistors dans les montages usuels sont simples, autant les phénomènes qui se déroulent dans ces minuscules triodes à cristal sont passablement complexes.

IG. — Puisque vous parlez « triode », je suppose qu'il y a, dans le transistor, une cathode, une grille et une anode.

CUR. — On y trouve, en effet, des régions qui, dans une certaine mesure, jouent un rôle analogue à celui des électrodes d'une triode : émission d'un flux d'électrons, réglage de son intensité et sa captation. Et, si vous voulez aller vraiment vite, je peux brièvement vous exposer l'emploi des transistors sans en analyser le principe de fonctionnement. Le désirez-vous?

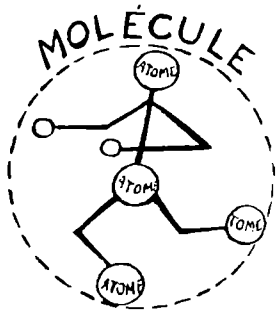
IG. — Non, je préfère comprendre ce qui se passe en réalité. Vous m'avez habitué à raisonner et à analyser le mécanisme des phénomènes étudiés. Restons dans la tradition.

Dès molécules et des atomes.

CUR. — Vous avez raison. Mais, dans ce cas, il faut que nous commencions par le commencement, c'est-à-dire par la constitution de la matière.

IG. — Il me semble que c'est là... une matière que nous connaissons bien. La plus petite particule d'une substance qui en garde toutes les propriétés chimiques s'appelle *molécule*, dit mon livre de physique.

CUR. — Il oublie d'ajouter que nous connaissons actuellement environ un demi-million de différentes molécules résultant de diverses combinaisons de quelque 100 éléments simples.



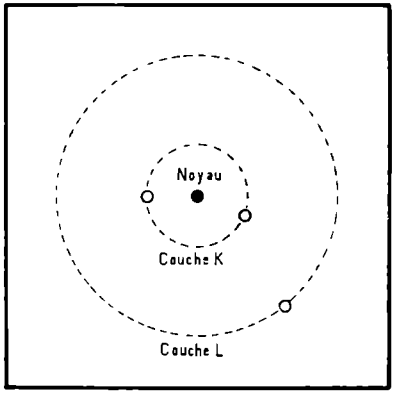
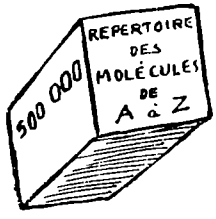


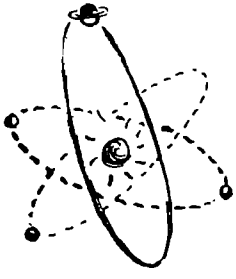
Fig. 2. — L'atome de lithium comprend deux électrons gravitant autour du noyau sur la couche K et un électron sur la couche L.



IG. — En revanche, il mentionne que les molécules se trouvent à une certaine distance les unes des autres (ce qui explique la compressibilité de tous les corps), qu'elles sont attirées les unes par les autres (heureusement, car sinon tout retomberait en poussière!) et qu'elles sont animées d'un mouvement désordonné dont la vitesse augmente avec la température.

CUR. — Bravo, Ignotus! Vous méritez de moins en moins votre nom... Brisons maintenant les molécules qui se décomposent en *atomes*, c'est-à-dire en particules élémentaires des corps simples (ou éléments). Chaque atome, vous le savez...

IG. — ... est un système solaire en miniature, avec son soleil central qu'est le noyau composé de *protons* (charges positives élémentaires) et de *neutrons*, et ses planètes sont les *électrons* ou charges élémentaires d'électricité négative qui gravitent autour.



CUR. — Vous parlez comme un livre. Mais il faut se méfier des analogies. Alors que toutes les planètes du système solaire évoluent dans le même plan, les électrons, eux, ont leurs orbites dans des plans différents. Et ces orbites ne sont pas disposées au hasard : elles ne peuvent occuper que des emplacements déterminés que l'on désigne sous le nom de « couches » K, L, M, N, O, P et Q. Ces sept couches, que l'on peut se représenter comme des sphères concentriques ayant le noyau pour centre, ont des rayons proportionnels au carré de leur rang.

IG. — Attendez, Curiosus! C'est un peu compliqué pour moi.

CUR. — Rien de plus simple. La couche K est la couche numéro 1. Dès lors, la couche L, qui porte le numéro 2, aura un rayon $2^2 = 4$ fois plus grand. La couche M aura un rayon $3^2 = 9$ fois plus grand, etc.

IG. — En sorte que le rayon de la septième couche, celle que vous appelez Q, sera $7^2 = 49$ fois plus grand que celui de la couche K?

CUR. — Bien entendu. Et, d'ailleurs, l'énergie dont chaque électron est animé est proportionnelle au numéro (on dit au « nombre quantique ») de la couche sur laquelle il se trouve.

IG. — Et ces distances de plus en plus élevées des couches par rapport au noyau, quelle en est la grandeur réelle?

CUR. — La couche la plus rapprochée du noyau en est distante de 5 milliardièmes de centimètre. Mais je crains fort que cela ne vous dise rien. Alors imaginez qu'une fée, d'un coup de baguette magique, puisse faire grossir les choses dix fois. Si notre fée donne ainsi 14 coups de baguette sur un atome de carbone (dont le noyau contient 6 protons et 6 neutrons et qui comprend 6 électrons dont 2 sur la couche K et 4 sur la couche L)...

IG. — Notre atome sera agrandi 10^{14} fois et va probablement être aussi grand que le globe terrestre, en sorte qu'on ne saura pas où le caser. Elle sera bien embêtée, la fée!

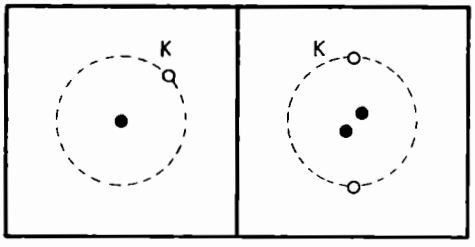
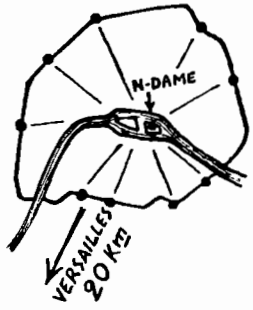


Fig. 3. — Voici les deux atomes les plus simples : hydrogène (à gauche) et hélium (à droite).



CUR. — Point du tout. Car les protons auront les dimensions de simples pommes, alors que les électrons (bien que leur masse soit 1 837 fois inférieure à celle des protons) seront gros comme des ballons de football. Et si le noyau est placé sur le parvis de Notre-Dame de Paris, les deux électrons de la couche K effectueront leur révolution à 5 kilomètres de là, soit aux portes de la capitale. Quant aux quatre électrons de la couche extérieure, on les trouvera à 20 kilomètres du noyau, par exemple à Versailles.

Ignotus a le vertige.

IG. — Mais alors qu'y a-t-il entre nos pommes et nos ballons de football?

CUR. — Rien! Du vide. Et bien entendu des forces d'attraction électriques, magnétiques et gravitationnelles qui maintiennent tout le système en équilibre. Les charges des signes contraires étant mutuellement attirées, les électrons ne quittent pas leurs noyaux en dépit des forces centrifuges qui tendent à les en arracher.

IG. — Vous me faites peur. Ainsi donc l'édifice de l'atome comprend tant de vide et si peu de matière!

CUR. — Mais oui, mon ami. Et si l'on pouvait comprimer tous les noyaux et tous les électrons qui composent votre corps de manière à ne pas laisser de vide entre eux, on obtiendrait un grain pesant toujours vos 70 kilogrammes, mais à peine visible au microscope.

IG. — Vous me donnez la chair de poule chaque fois que vous me rappelez que je suis, moi aussi, composé d'atomes. Et maintenant que

vous m'avez révélé quel vide règne en moi, je suis pris d'un atroce vertige.

Cur. — Aussi ferons-nous bien de nous tourner vers des atomes autres que ceux de votre corps. Et, pour les représenter plus aisément, nous conviendrons de dessiner chaque couche sous la forme d'un cercle. Vous voyez ainsi que l'atome le plus simple est celui de l'hydrogène

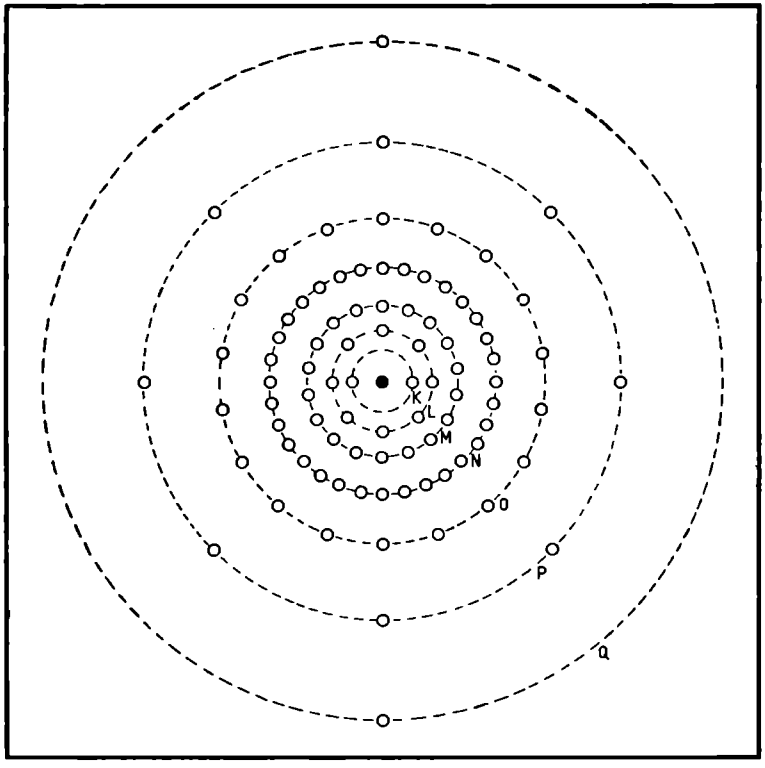


Fig. 4. — Répartition des couches électroniques autour du noyau et nombre maximum d'électrons pouvant habiter chaque couche. Telle est l'architecture de l'atome de radium.

qui se compose d'un seul proton et d'un seul électron placé sur la couche K. Dans l'hélium, 2 électrons, placés sur cette même couche, gravitent autour de 2 protons du noyau.

Ig. — Et quel sera l'élément comportant 3 électrons sur la couche K?

Nombre de places limité.

Cur. — Aucun. Car cette couche ne saurait contenir plus de deux électrons. De même, la couche L ne pourrait en avoir plus de 8, la couche M plus de 18, la couche N plus de 32, la couche O plus de 18, et la couche P plus de 8.

Ig. — Et la couche Q?

Cur. — On ne le sait pas encore. Mais je pense que ce nombre doit être 2. Car il y a une loi très simple qui permet de calculer les nombres maxima des électrons de chaque couche :

Couche K : $1^2 \times 2 = 2$
Couche L : $2^2 \times 2 = 8$
Couche M : $3^2 \times 2 = 18$
Couche N : $4^2 \times 2 = 32$
Couche O : $3^2 \times 2 = 18$
Couche P : $2^2 \times 2 = 8$
Couche Q : $1^2 \times 2 = 2$ (?)

Ig. — C'est très joli, mais j'ai l'impression que nous allons nous enfoncer dans les méandres de la physique atomique et nucléaire.

Cur. — Au contraire, nous allons tout de suite prendre une décision qui nous simplifiera grandement l'étude de toutes ces questions. Si vous voulez bien, nous ne tiendrons désormais compte que des électrons de la couche extérieure d'un atome.

Ig. — Allons bon! Vous venez, avec un certain sadisme, de me révéler l'existence de ces nombreuses couches qui font ressembler l'atome à une sorte d'oignon. Et maintenant vous me défendez de l'éplucher! Est-ce pour m'épargner des larmes?...

Neutralité et ionisation.

Cur. — La décision que nous devons prendre est parfaitement légitime. Qu'est-ce qui nous intéresse en fin de compte? C'est l'état électrique des atomes. Or, normalement, un atome comporte autant d'électrons que de protons, en sorte que les charges négatives de ceux-là équilibrent les charges positives de ceux-ci. Un tel atome est *neutre*. Mais il peut advenir que des forces extérieures lui arrachent un ou plusieurs électrons. En ce cas, l'équilibre est rompu : les charges négatives des électrons sont, au total, inférieures à la charge positive du noyau. Dès lors l'atome est positif. On l'appelle alors *ion* positif.

Ig. — Et, si, au contraire, l'atome reçoit, pour une raison quelconque, des électrons excédentaires, il devient négatif. Je suppose qu'on peut alors l'appeler ion négatif.

Cur. — Parfaitement. Or, ces pertes ou ces acquisitions d'électrons (phénomènes d'*ionisation*) ne peuvent avoir lieu que sur la couche extérieure, c'est-à-dire là où l'attraction du noyau s'exerce avec moins de force.

Ig. — Oui, je comprends que, dans ces conditions, seuls les électrons de cette couche puissent nous intéresser.

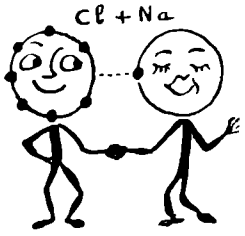
Questions matrimoniales.

Cur. — Il y a à cela encore une autre raison. C'est, en effet, cette couche qui détermine les affinités chimiques des éléments. Un atome n'est vraiment satisfait de l'existence que lorsqu'il a 8 électrons sur sa couche extérieure. Dans ces conditions, il est parfaitement stable et ne songe pas à acquérir ou à perdre des électrons. Ainsi, par exemple, le néon, qui possède 8 électrons sur sa couche extérieure L, est très heureux et ne cherche à entrer en liaison avec aucun autre élément chimique. Mais le fluor, lui, qui dans cette même couche extérieure n'a que 7 électrons, ne demande qu'à entrer en combinaison avec un

autre élément capable de lui céder un électron pour compléter sa couche extérieure à 8.

IG. — Et comment s'effectuent de tels mariages?

CUR. — Eh bien, prenez le cas du chlore qui, sur sa couche extérieure M, n'a que 7 électrons, et celui du sodium qui a 2 électrons sur la couche K, 8 sur L et seulement 1 sur M. Voilà l'exemple type du couple idéal! Le sodium, en se combinant avec le chlore, lui cèdera son unique électron de la couche extérieure en complétant à 8 celle du



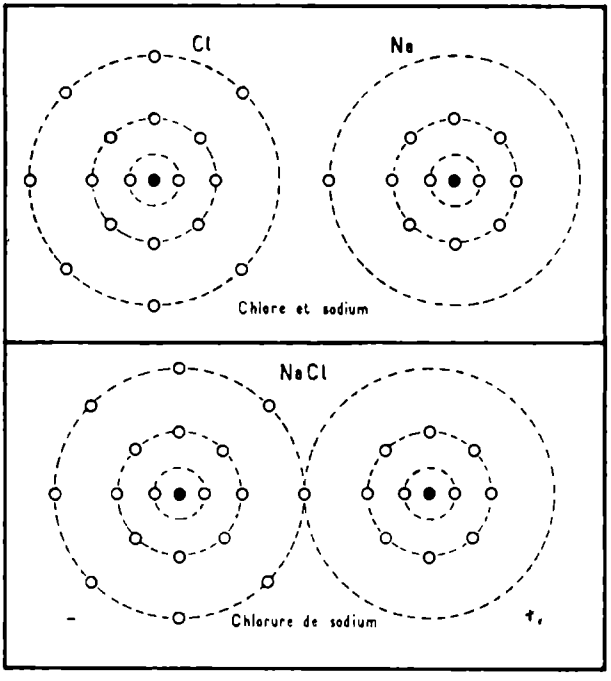


Fig. 5. — Le mariage d'un atome de chlore (Cl) et d'un atome de sodium (Na, du nom latin « natrium »), donne lieu à une molécule de chlorure de sodium.

chlore. Et, du coup, dans l'atome du sodium, c'est la couche L qui, avec ses 8 électrons, deviendra couche extérieure, assurant une parfaite stabilité.

IG. — Mais alors, avec son électron excédentaire, le chlore sera ionisé négativement, alors que le sodium, qui a perdu cet électron, sera ionisé positivement?

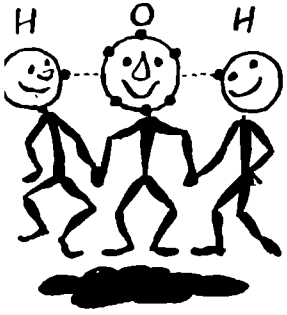
CUR. — Bien entendu. Et l'attraction mutuelle de ces deux ions rendra stable l'édifice de la molécule résultant de ce mariage.

IG. — Et quel en est le nom?

CUR. — Chlorure de sodium, lorsque vous l'achetez en pharmacie. Mais votre épicier vous vend la même substance sous le nom de sel de cuisine.

Ig. — Je m'en doutais... Et je suppose que de la même manière on peut expliquer toutes les autres aventures matrimoniales des atomes. Comment cela se passe-t-il, par exemple, pour l'eau?

Cur. — Très gentiment. L'atome d'oxygène comprend 2 électrons sur la couche K et 6 sur la couche L. Il y a donc, sur cette dernière,



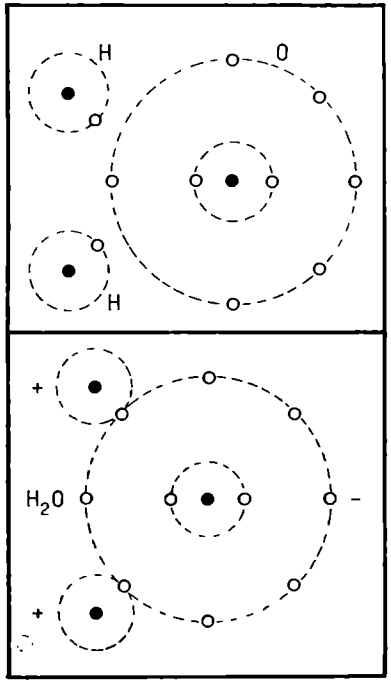
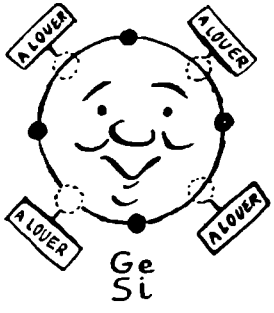


Fig. 6 — Deux atomes d'hydrogène (H) viennent, par leur électrons, compléter à 8 le nombre d'électrons de la couche L de l'oxygène (O) formant ainsi une molécule d'oxyde d'hydrogène vulgairement appelée... eau.



de la place pour 2 autres électrons. Et l'oxygène les emprunte à 2 atomes d'hydrogène car, je vous le rappelle, ce dernier ne contient qu'un électron par atome.

Ig. — Je comprends maintenant pourquoi la molécule d'eau se compose d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.

Cur. — La couche externe est souvent appelée « couche de valence », car son nombre d'électrons montre quelles combinaisons elle est apte à accomplir. Et on désigne comme « nombre de valence » le nombre d'électrons qui manquent à la couche pour être stable ou, au contraire, celui qu'elle peut céder à un autre atome pour la rendre stable.

Ig. — Excusez-moi, mais cela ne me paraît pas bien clair.

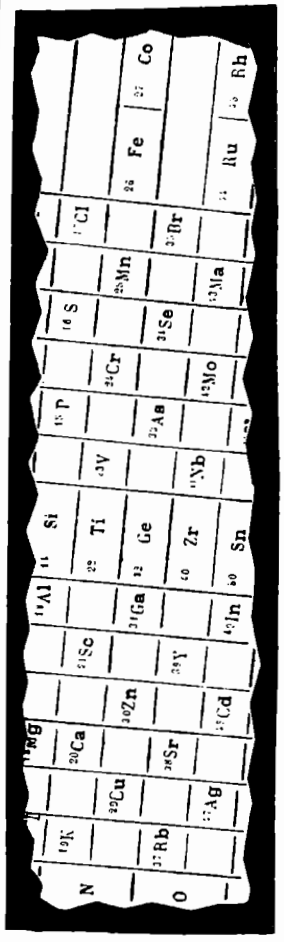
Cur. — Si la couche extérieure comporte 6 ou 7 électrons, il lui en manque respectivement 2 ou 1 pour être complétée à 8. On dit de tels atomes qu'ils sont *bivalents* ou *monovalents*. Mais si la couche extérieure n'a que 1 ou 2 ou 3 électrons, l'atome serait plutôt enclin à les céder. Et nous sommes en présence d'éléments monovalents, bivalents ou *trivalents*.

Ig. — Et si la couche extérieure a 4 électrons?

Cur. — En ce cas, l'atome serait très heureux d'entrer en liaison avec un autre comportant également 4 électrons sur sa couche extérieure, pour établir avec eux des liens de valence. Un tel atome est donc

Nombre atomique	NOM DE L'ELEMENT	Symbole	Nombre d'électrons sur chaque couche				
			K	L	M	N	O
13	Aluminium	Al	2	8	**3**		
14	Silicium	Si	2	8	**4**		
31	Gallium	Ga	2	8	18	**3**	
32	Germanium	Ge	2	8	18	**4**	
33	Arsenic	As	2	8	18	**5**	
49	Indium	In	2	8	18	18	**3**
51	Antimoine	Sb	2	8	18	18	**5**

Fig. 7. — Répartition des électrons (dont le nombre total porte le nom de « nombre atomique ») sur les différentes couches, pour les principaux éléments entrant dans la composition des transistors. En gras sont indiqués les nombres déterminant la valence.

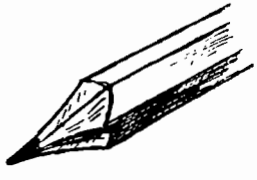


tétravalent. C'est notamment le cas des atomes de germanium et de silicium qui sont utilisés dans les transistors; et c'est aussi le cas du carbone. Enfin, si la couche extérieure a 5 électrons, l'atome est *pentavalent.* Et puisque nous revenons à la question des transistors, je vous présente quelques autres éléments chimiques qui entrent dans leur composition. D'une part, l'aluminium, l'indium et le gallium dont la couche extérieure n'a que 3 électrons et qui sont trivalents; d'autre part l'arsenic et l'antimoine dont la couche extérieure a 5 électrons et qui sont pentavalents.

La vie sociale des atomes.

Ig. — Allons-nous ainsi passer en revue tous les éléments chimiques?

Cur. — Non, rassurez-vous. Maintenant vous êtes familiarisé avec tous ceux qui jouent un rôle essentiel dans la technologie des transistors. Mais nous aurions tort de n'envisager que la psychologie individuelle des atomes. Ce qui nous intéresse, c'est leur vie sociale. A l'exception de farouches individualistes, tel le néon qui, avec sa couche complète de 8 électrons, se refuse sauvagement à toute liaison, les atomes, ne l'oubliez pas, vivent en société. Et leurs groupements sont plus ou moins bien organisés. Ainsi, par exemple, les atomes du carbone peuvent être disposés sans apparence d'ordre. Nous sommes alors en présence du carbone amorphe ou graphite. Dans ce corps, les électrons de la couche extérieure ne sont pas très solidement attachés et, si l'on applique une différence de potentiel entre deux points, ils se mettent assez facilement en mouvement, passant d'un atome à l'autre.



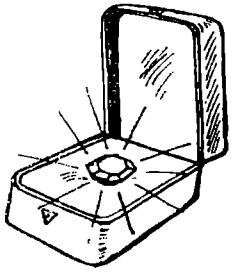
Ig. — Je sais que le graphite est un assez bon conducteur.

Cur. — Mais prenez les mêmes atomes de carbone groupés dans un ordre parfait. Comment? Mais tout simplement grâce aux liens de valence, chaque atome étant, par ses 4 électrons extérieurs, lié à 4 autres atomes. Je vous dessine seulement un atome lié à ses 4 voisins. Mais chacun de ceux-ci est à son tour lié à 4 atomes (dont celui qui

figure sur le dessin) et ainsi de suite. Le tout forme une répartition régulière des atomes dans l'espace. Nous obtenons ainsi un *réseau cristallin*.

IG. — Vous me croyez sans doute très ignorant. Je sais cependant que, sous sa forme cristalline, le carbone est extrêmement apprécié puisque ce n'est rien d'autre que le diamant.

CUR. — Bravo, Ignotus! Et vous devinez aisément que l'exceptionnelle dureté du diamant est justement due à cette régulière disposition des atomes qui se tiennent solidement les uns les autres.



IG. — Oui, l'unité fait la force! Tandis que dans le graphite ces mêmes atomes sont tellement peu liés les uns aux autres que le graphite constitue un excellent lubrifiant sec.

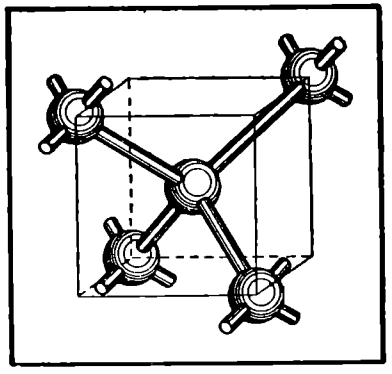


Fig. 8. — L'atome de carbone, au centre du cube, est lié par ses électrons de valence à quatre autres atomes. (Le cube n'est dessiné que pour rendre claire la disposition des atomes dans l'espace.) Le cristal de germanium a une structure identique.

CUR. — Cependant, ce qui nous intéresse, ce sont les propriétés électriques et non mécaniques. Et vous devinez que, solidement maintenus par des liens de valence, les électrons du diamant se refusent obstinément à quitter leurs atomes.

IG. — C'est donc un excellent isolant. Je ne manquerai pas d'en conseiller l'usage à notre chef d'atelier pour remplacer les vulgaires céramiques ou polystyrènes...

CUR. — Soyez sérieux, Ignotus. Car nous sommes parvenus à un point critique de notre exposé. Vous avez vu que, au même titre que le carbone, le germanium (et le silicium) a 4 électrons sur la couche extérieure. Et comme le carbone, il est capable de former des cristaux où chaque atome tend quatre bras vers quatre atomes voisins.

IG. — Nous voilà bien avancés avec vos atomes qui, avec leurs bras multiples, ressemblent à des dieux hindous! Si vous avez de tels réseaux cristallins, les électrons y sont trop rigidement fixés pour se déplacer. Vos cristaux sont donc encore de bons isolants.

CUR. — Oui et non, cher ami.

IG. — Que signifie cette réponse sybilline?

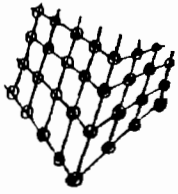
CUR. — C'est ce que nous verrons la prochaine fois.

Les impuretés présentes dans les semiconducteurs, même en quantités infimes, en changent profondément le comportement électrique. Nos deux amis étudieront ici ce qui se passe lorsque des atomes étrangers viennent modifier les structures cristallines régulières.

★ **SOMMAIRE : Conductibilité intrinsèque. - Cellules photorésistantes et photo-émettrices. - Impuretés. - Donneurs. - Trous ou lacunes. - Accepteurs. - Semiconducteurs types P et N. - Jonction. - Barrière de potentiel. - Tensions directe et inverse. - Tension de Zener. - Diode. - Redressement par semiconducteurs.**

LES JONCTIONS

La vie paisible des familles.



IGNOTUS. — J'ai beaucoup réfléchi à vos réseaux cristallins et je suis même allé au Palais de la Découverte examiner les modèles qui représentent la structure de différents cristaux. C'est très joli, ces petites boules de couleurs variées figurant les atomes et reliées entre elles par des tiges métalliques, donnant l'image des liens de valence.

CURIOSUS. — Je vous félicite d'employer aussi bien vos loisirs. Et à quoi ont abouti vos cogitations?

IG. — A l'idée qu'un cristal de germanium ressemble à un grand nombre de familles dont chacune a 4 enfants; et chacun des enfants

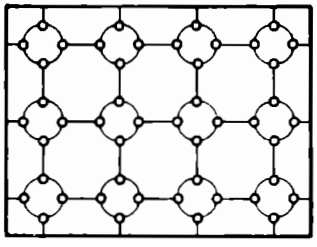
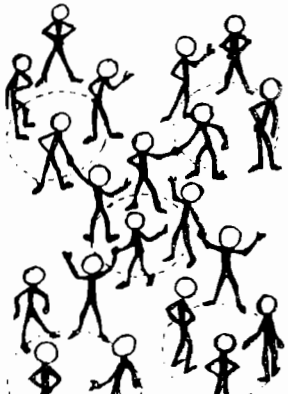


Fig. 9. — Le réseau cristallin du germanium peut être représenté comme ci-contre. En réalité, les liaisons des atomes sont disposées non pas dans le plan, mais dans l'espace. Mais notre dessin schématique offre l'avantage d'être clair.



d'une famille est marié avec un enfant d'une des 4 autres familles. De la sorte, chaque famille est, par les liens de mariage, apparentée à 4 autres.

CUR. — Pas mal du tout, votre image. Elle me facilitera même les explications que j'allais vous donner. En effet, dans cette société magnifiquement équilibrée que vous évoquez, il ne saurait y avoir normalement de grands bouleversements. Je veux dire que tous les couples doivent rester fidèlement unis. Et, dans notre cristal de germanium, tous les électrons doivent demeurer attachés à leurs atomes par de solides liens de valence.

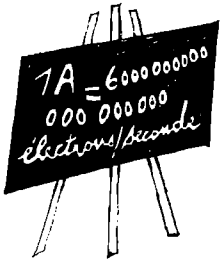
IG. — Cependant, que faites-vous des passions humaines?

De quelques divorces.

CUR. — Je vois que vous avez lu quelque roman sentimental... Eh bien, oui. De même que les humains sont agités par des passions, les atomes subissent l'agitation thermique. Elle parvient, de temps à autre, à rompre les liens qui attachent un électron à son atome et à le libérer. Et vous savez que quand il y a des électrons libres...

IG. — ... le corps devient conducteur de courant. Y a-t-il beaucoup d'électrons libres dans le germanium à la température normale?

CUR. — Non, fort peu. A peine 2 électrons pour 10 milliards (soit 10^{10}) d'atomes. C'est comme si, pour une population double de celle de la terre, il n'y avait qu'un seul homme libre.



IG. — Quelle horrible image! Mais s'il en est ainsi, le germanium est un très mauvais conducteur?

CUR. — En effet, et c'est la raison pour laquelle on l'appelle semi-conducteur. Notez cependant qu'un gramme de germanium contient dix mille milliards de milliards (soit 10^{22}) d'atomes, en sorte qu'on y trouve quand même quelque deux mille milliards (soit 2×10^{12}) d'électrons libres. C'est mieux que rien... et cela suffit pour permettre le passage d'un faible courant.

IG. — Vous me parlez de milliards de milliards d'électrons, et affirmez que le courant est faible!

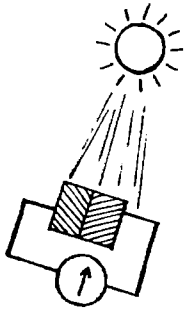
CUR. — Avez-vous donc oublié, Ignotus, que l'intensité d'un ampère correspond au passage de six milliards de milliards (6×10^{18}) d'électrons par seconde. Vous constatez donc que nos pauvres milliers de milliards d'électrons libres, dispersés dans l'immense réseau cristallin du germanium, ne peuvent assurer qu'une faible conductibilité. Celle-ci, due à l'agitation thermique (je vous le rappelle), porte le nom de *conductibilité intrinsèque*.

IG. — C'est, en somme, comme si, dans notre société régulière, il y avait quelques rares divorces et remariages qui détermineraient des déplacements d'une famille à l'autre.

CUR. — C'est bien ainsi. Et, pour mieux utiliser votre comparaison, disons qu'il peut souffler dessus « le vent torride des passions » (comme disent les romans), qui provoque alors de grands bouleversements.

IG. — Je devine ce que vous voulez dire. Si l'on accroît la température d'un cristal de germanium, l'agitation thermique devient plus violente et parvient à libérer un nombre plus grand d'électrons. La conductibilité intrinsèque augmente alors.

CUR. — Bien raisonné, Ignotus! Et c'est pour cela que le germanium fonctionne mal aux températures élevées. Car ce n'est pas sa conductibilité intrinsèque qui nous intéresse et qu'on utilise. Le silicium, lui, supporte mieux la chaleur, parce que ses électrons de valence, placés sur la troisième couche, sont plus solidement attachés au noyau que ceux du germanium, évoluant sur la quatrième couche. J'ajouterai que l'on peut encore provoquer la libération d'électrons en apportant aux atomes du germanium, non plus l'énergie de la chaleur, mais celle de la lumière.



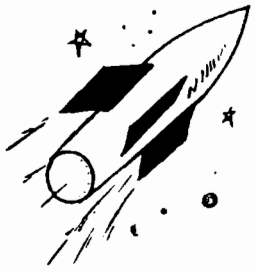
IG. — Voulez-vous dire que les « photons », ces grains de lumière, en bombardant les atomes du germanium, parviennent à en arracher des électrons?

CUR. — Mais oui. Et c'est ce qui permet de faire des cellules photo-électriques, c'est-à-dire des dispositifs dont la résistance varie sous l'action de l'éclairement. La plus ancienne des cellules connues est celle utilisant le sélénium, qui est également un semiconducteur.

IG. — Je me sers d'ailleurs d'un posemètre pour photo, équipé d'une telle cellule...

CUR. — La cellule que vous avez n'est pas au sélénium, — qui est une substance photo-résistante, — mais probablement au cadmium ou au silicium. Ce sont des matières photo-émettrices, c'est-à-dire transformant l'énergie lumineuse en courant électrique.

IG. — N'est-ce pas de telles cellules qui, soumises à la lumière du soleil, assurent l'alimentation en courant électrique de certains satellites artificiels?



Le scandale des familles nombreuses.

CUR. — Oui, Ignotus, mais, maintenant, nous allons provoquer une perturbation dans votre société si bien organisée, en y introduisant une famille de cinq enfants.

IG. — Que voulez-vous dire par là?

CUR. — Que, parmi les atomes de germanium le plus pur, on trouve, en très faible quantité, des atomes d'autres éléments constituant des

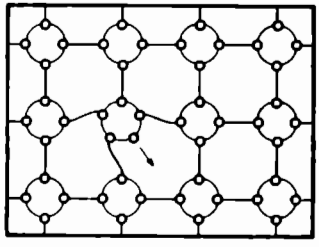


Fig. 10. — Un atome d'impureté pentavalent est venu rompre la belle ordonnance du réseau cristallin. Qu'adviendra-t-il du 5e électron de cet atome?

« impuretés ». Le germanium le plus pur en contient pourtant la proportion de un pour un milliard.

IG. — C'est comme s'il n'y en avait pas.

CUR. — Vous avez tort de négliger ces impuretés, car même en aussi faible proportion, cela fait cinquante mille milliards d'atomes étrangers dans un centimètre cube de germanium dit « pur ».

IG. — Je ne pensais pas que ce centimètre cube contenait cinquante mille milliards de milliards d'atomes... Mais que vient faire la famille de cinq enfants? Voulez-vous dire qu'il s'agit d'un atome avec cinq électrons sur la couche extérieure?

CUR. — Exactement. Un atome pentavalent, par exemple celui d'arsenic ou d'antimoine, s'est introduit dans la noble société des atomes de germanium... et le scandale éclate!

IG. — Car si l'on arrive à marier quatre des enfants de cette originale famille avec des enfants de quatre familles voisines, le cinquième reste désespérément célibataire.

CUR. — Oui, Ignotus, les quatre premiers électrons ayant formé des liens de valence avec quatre atomes voisins du réseau cristallin, le cinquième demeure libre. Et si une voix l'appelle vers une des extrémités du cristal, il en franchira les mailles pour s'y rendre.

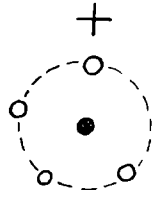
IG. — Si je comprend bien, en appliquant une tension entre deux points d'un tel cristal, on peut y faire passer un courant, car les électrons libres, dus à des atomes pentavalents, seront attirés par le pôle positif

et y afflueront, le pôle négatif de la source laissant alors entrer dans le cristal le même nombre d'électrons.

CUR. — Oui, c'est bien ainsi que les choses se passent dans le semiconducteur contenant des impuretés pentavalentes, c'est-à-dire avec un excès d'électrons. On dit que le semiconducteur est du *type N* (négatif). Et les impuretés sont souvent appelées *donneurs* (car elles donnent des électrons libres).

IG. — Quel est le taux normal des impuretés?

CUR. — Tout au plus, un atome pour dix millions d'atomes de germanium, soit la proportion de quatre personnes pour toute la population de France.



IG. — Oui, et pourtant cela fait quand même cent fois plus d'impuretés que dans le germanium le plus pur. Mais que devient donc l'atome d'impureté, disons d'arsenic, dont l'électron libre s'est détaché? A mon avis, il cesse d'être neutre et, comptant désormais moins d'électrons que de protons, doit devenir positif.

CUR. — Eh! oui. Aussi paradoxal que le fait paraisse, dans le germanium du type N, les impuretés se trouvent ionisées positivement.

Histoires de kidnapping.

IG. — Et qu'adviendrait-il dans notre société cristalline si l'une des familles n'avait que trois enfants, autrement dit si l'on introduisait, dans le cristal de semiconducteur, des atomes n'ayant que trois électrons sur la couche extérieure?

CUR. — Le scandale déclenché ne serait pas moindre que dans le cas des familles trop nombreuses. Cet atome trivalent forme des liens de valence avec trois atomes voisins, mais le quatrième reste vide. Il y a

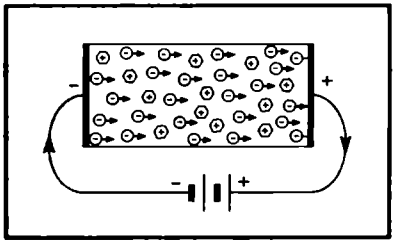


Fig. 11. — Conduction dans un semiconducteur du type N. Les électrons libres (marqués —) se détachent des atomes pentavalents qui, de se fait, sont ionisés positivement (marqués +).

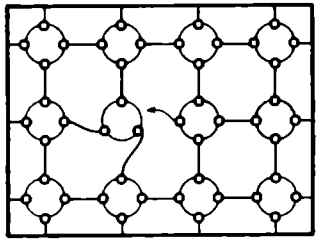


Fig. 12. — Ici, le réseau cristallin du semiconducteur contient un atome d'impureté trivalent qui tentera d'attirer un électron d'un atome voisin.

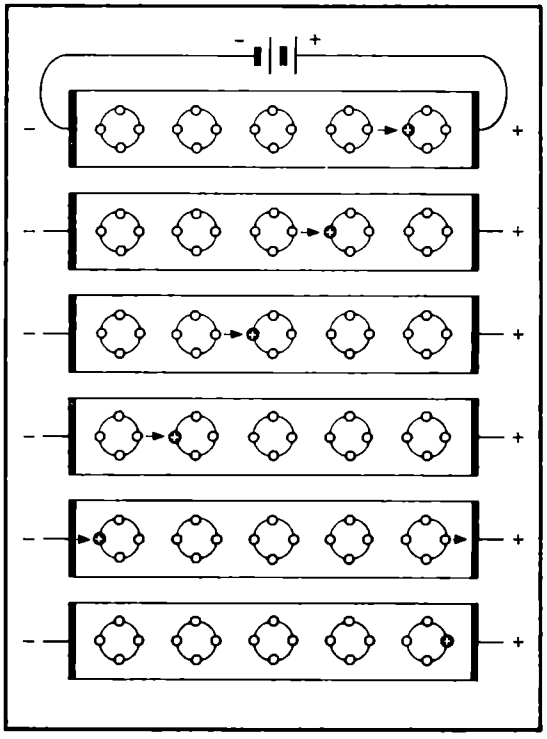
là un « trou » ou une « lacune », qu'un électron d'un atome voisin pourrait fort bien combler.

IG. — En somme, cette famille de trois enfants ne demande qu'à en adopter un quatrième, pour suivre la tradition de la tribu ou, plutôt, pour se conformer à son organisation générale. Mais si elle « emprunte » cet enfant à une famille voisine, celle-ci, à son tour, présentera une lacune.

CUR. — Bien entendu. Et ce mouvement d'emprunts ou de rapts d'enfants peut même se propager d'un bout du cristal à l'autre.

IG. — En lui appliquant une tension, je suppose?

CUR. — Evidemment. Mais suivez attentivement ce qui se passe alors. Venant de la direction dans laquelle se trouve le pôle négatif, un électron vient combler le « trou » de l'atome trivalent. L'électron s'est donc rapproché du pôle positif, alors qu'un nouveau « trou » s'est formé dans l'atome voisin, plus proche du pôle négatif. Puis, le même phénomène se reproduit. Le nouveau « trou » est, à son tour, comblé par un électron que cela rapproche du pôle positif, alors qu'un « trou » s'est formé ainsi encore plus près du pôle négatif. Et quand, à la suite de ce cheminement, un électron atteint le pôle positif, d'où il est dirigé vers la source de tension, un « trou » atteint le pôle négatif, où il est comblé par un électron émanant de la source.



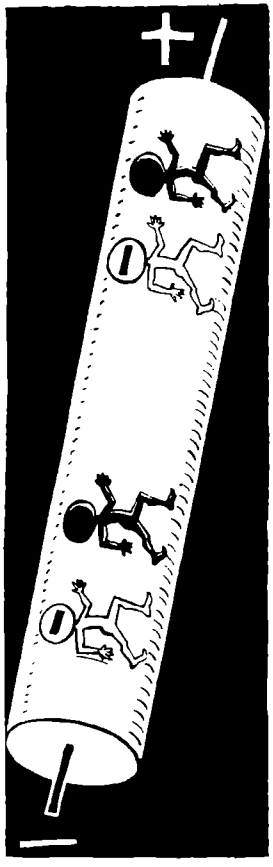
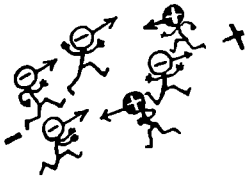


Fig. 13. — Dans un semiconducteur du type P, le « trou » d'une impureté trivalente est comblé par un électron venant du côté négatif; cela crée un nouveau trou qui, à son tour, est comblé par un électron venant d'un atome voisin, et ainsi de suite. Notre dessin montre les phases successives de cette conduction où le trou (qui constitue une charge positive) se déplace du pôle positif au pôle négatif. Dans la dernière phase, un électron venant de la source de courant vient combler le trou le plus proche du pôle négatif; en même temps, un autre électron quitte l'atome le plus proche du pôle positif en y créant un nouveau « trou ». Et tout recommence!...

Les deux « fluides ».



Ig. — En somme, pendant que les électrons se dirigent, comme il se doit, vers le pôle positif qui les attire, les « trous », eux, se déplacent vers le pôle négatif, comme si c'étaient des charges positives.

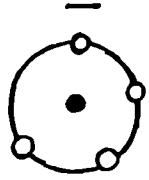
Cur. — Oui, en effet, tout se passe comme si, dans un semiconducteur avec impuretés trivalentes, des charges positives, — le contraire des électrons, — se propageaient du pôle positif vers le pôle négatif.

Ig. — Ainsi, les « trous » suivent la direction conventionnelle du courant électrique, du positif au négatif, alors que les électrons vont en sens inverse. Mais peut-on dire qu'ici on a un courant formé par des charges positives?

Cur. — Pourquoi pas? Jadis, un physicien nommé Syoner a bien émis l'hypothèse que le courant était formé de deux « fluides » allant en sens contraire. Il ne faut cependant pas oublier que le « trou » n'est qu'une place vacante offerte à un électron.

Ig. — Je suppose que le semiconducteur ayant des impuretés trivalentes doit appartenir au *type P* (positif)?

Cur. — C'est bien ainsi qu'on le désigne. Et, puisque vous êtes en veine de raisonner correctement, pouvez-vous me dire ce que deviennent les atomes des impuretés lorsque les électrons viennent des atomes voisins combler leurs trous?



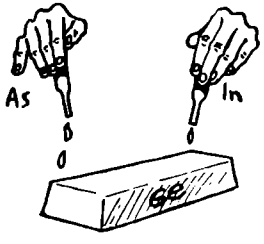
Ig. — Ils deviennent négatifs, ionisation due au fait que le nombre de leurs électrons devient supérieur à celui de leurs protons... C'est bien curieux que, dans le type N, les impuretés deviennent ionisées positivement, et, dans le type P, négativement.

Cur. — J'ajouterai que ces atomes d'impuretés du type P, tels que ceux d'aluminium, de gallium ou d'indium, sont souvent appelés *accepteurs*, car c'est eux qui reçoivent des électrons, alors que ceux du type N les donnaient.

Ig. — Je commence à sentir qu'une salade se forme dans mon cerveau, avec tous ces donneurs et accepteurs.

Cur. — Aussi, vais-je vous donner un petit tuyau mnémotechnique : dans « *donneur* » il y a N et dans « *accepteur* » il y a P.

Ig. — Merci! Ce sera plus facile.



Une jonction qui est une barrière.

Cur. — Et puisque vous connaissez maintenant les mœurs de ces sociétés cristallines dont la quiétude est perturbée par les extravagantes familles de donneurs et d'accepteurs, examinons ce que donnerait l'association d'un semiconducteur du type N avec un autre du type P. Imaginez que je parvienne à accoler un morceau de germanium d'un type avec un autre du type opposé. Ou bien encore que, prenant une barre de germanium pur, j'en « empoisonne » une moitié en y introduisant des atomes donneurs (par exemple de l'arsenic), alors que l'autre moitié sera infestée par des atomes accepteurs (ceux d'indium, si vous voulez bien). La zone limite entre ces deux types de semiconducteurs porte le nom de *jonction N-P*. Son épaisseur est de l'ordre de 0,3 mm, mais cette minceur ne l'empêche pas de jouer un rôle prodigieux.

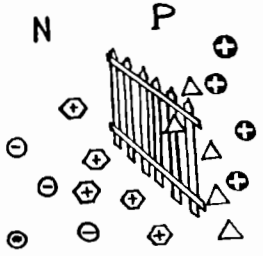
Ig. — Je ne vois pas ce qu'elle a de particulier. Dans chaque moitié de notre barre, les électrons continueront leurs petites promenades, ignorant ce qui se passe dans l'autre moitié.

CUR. — Erreur! L'agitation thermique normale sera maintenant accompagnée d'un autre phénomène. Les atomes, négativement ionisés de la région P, vont repousser loin de la jonction les électrons libres de la région N.

IG. — C'est vrai, je n'avais pas songé à cette répulsion des charges du même nom... Mais, dans ce cas, les atomes positivement ionisés de la région N doivent, de leur côté, repousser loin de la jonction les trous de la région P.

CUR. — Il est exact que ces trous (que l'on peut considérer comme des charges positives élémentaires) sont ainsi repoussés. En réalité, les ions positifs de la région N attirent des électrons de la région P vers la jonction, en leur faisant combler les trous qui en sont voisins. Et les électrons ainsi arrachés laissent des trous dans les atomes éloignés de la jonction. Mais tout se passe comme si les trous avaient émigré vers l'extrémité de la zone P.

IG. — Et dans la partie proche de la jonction, toutes les impuretés de la zone P seront donc comblées, autrement dit ionisées négativement. De même, dans la zone N, tous les atomes pentavalents proches de la jonction auront perdu un électron, ce qui les rendra positifs. Très curieux, tout cela : cette jonction devient une sorte de barrière entre les deux zones, dont une est à un potentiel négatif et l'autre à un potentiel positif.



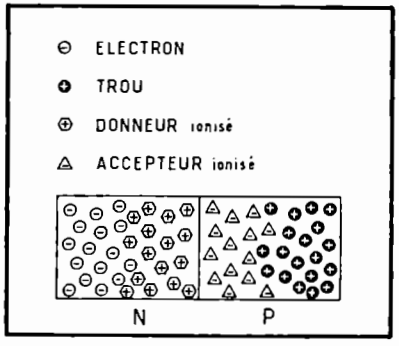
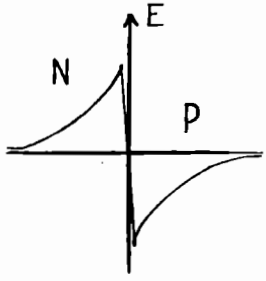


Fig. 14. — Jonction N-P. Les trous de la zone P sont comblés près de la jonction, mais ne le sont pas dans la partie plus éloignée. De même, les électrons libres de la zone N sont repoussés loin de la jonction; ils émanent des atomes d'impuretés qui en sont proches. (Bien noter les quatre symboles qui seront utilisés dans les dessins qui suivent.)



CUR. — Oui, vous avez très bien raisonné : la jonction constitue une véritable *barrière de potentiel*. Dans cette mince pellicule de semiconducteur, le potentiel des atomes ionisés passe brusquement d'une valeur positive (dans la zone N, ne l'oubliez pas!) à une valeur négative (dans la zone P). Mais la charge totale, elle, est nulle, car, dans chaque région, les charges positives et négatives s'équilibrent et s'annulent. En accolant le semiconducteur P au semiconducteur N, nous avons simplement provoqué un déplacement de ces charges vers les deux extrémités de chaque région, alors qu'auparavant elles étaient réparties à peu près également.

IG. — Tout cela me paraît fort clair. Mais quelle est l'utilité de notre jonction avec sa barrière de potentiel?

CUR. — Vous la trouverez tout de suite, si vous appliquez une tension aux deux extrémités de notre barrière.

Electrons et trous en promenade.

IG. — Je suppose que nous aurons un courant formé, d'une part, par les électrons libres de la région N et, d'autre part, par les trous de la région P, les uns allant dans le sens contraire des autres.

CUR. — Ce que vous dites peut être vrai, mais vous allez un peu trop vite en la matière. Il convient, en effet, d'examiner ce qui se passe

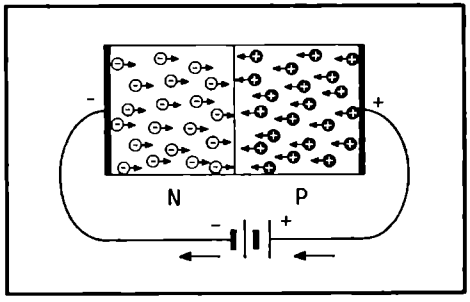


Fig. 15. — Passage du courant dans une jonction N-P. Dans le dessin, nous n'avons représenté que les porteurs des charges : électrons (marqués —) et trous (marqués +), en omettant, pour plus de clarté, les donneurs de la zone N et les accepteurs de la zone P.

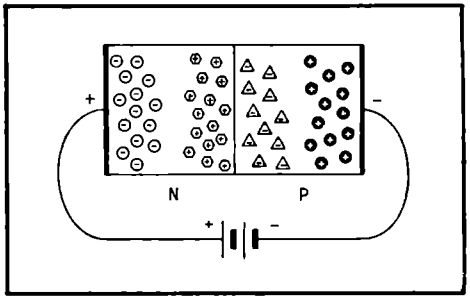
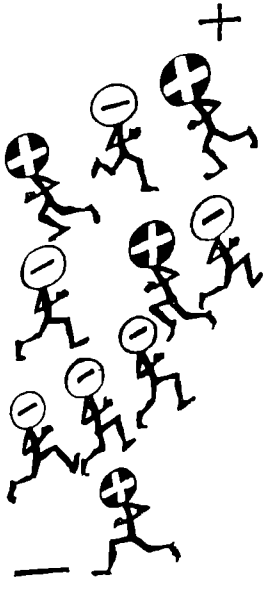


Fig. 16. — En appliquant à la jonction N-P une tension inverse, on se heurte à la « barrière de potentiel » qui empêche le passage du courant. La tension sur la jonction augmente.



selon la polarité des potentiels appliqués. Admettons d'abord que le pôle positif de la source de tension soit relié à la zone P et le pôle négatif à la zone N.

IG. — Eh bien. Dans la zone N, les électrons libres du semiconducteur seront repoussés vers la jonction par ceux venant de la source. Ils traverseront donc la jonction et se mettront à combler les trous que le potentiel positif de la source aura chassés vers cette jonction.

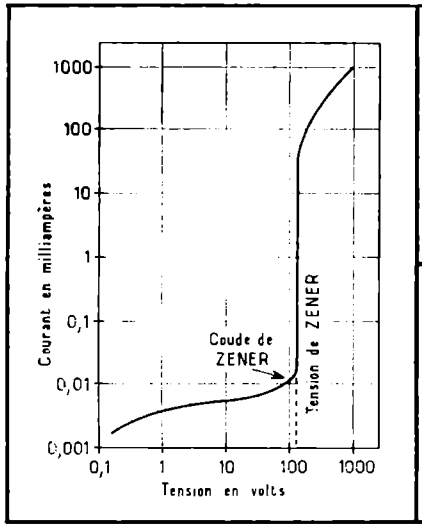
CUR. — Disons, pour être plus précis, que le pôle positif de la source attirera un électron chaque fois qu'un autre électron aura franchi la jonction, sautant de la zone N vers la zone P. Et l'électron, attiré par la source, créera un trou qui, comblé par un électron plus proche de la jonction, y laissera, à son tour, une lacune. Et, ainsi de suite, le trou, se déplaçant vers la jonction où un nouvel électron émanant de la zone N, le comblera.

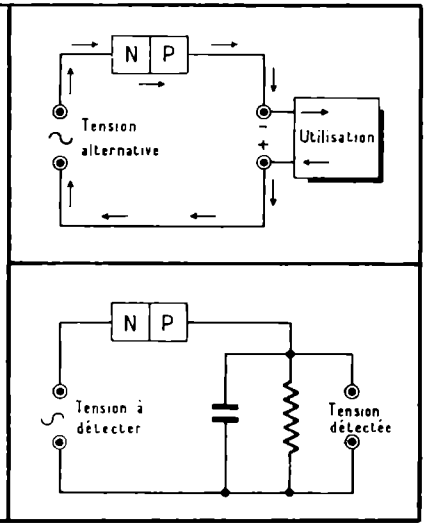
IG. — Par conséquent, j'avais parfaitement raison en disant qu'un courant s'établit, formé par des électrons et des trous, allant les uns à la rencontre des autres.

CUR. — Oui, c'est exact quand on applique, comme nous venons de la faire, une *tension directe*, c'est-à-dire le pôle positif de la source à la zone P et le pôle négatif à la zone N. Mais, si l'on applique une *tension inverse*, les choses n'iront pas aussi bien.

IG. — Pourquoi donc? Les électrons du pôle négatif de la source vont attirer les trous de la zone P plus près de l'extrémité de la barre. Et, à l'autre extrémité, le potentiel positif de la source va attirer davantage les électrons libres. Diable!... Cela ne fera que renforcer la barrière de potentiel... et aucun courant ne pourra s'établir!

CUR. — Je ne vous le fais pas dire. Vous voyez donc que le courant ne s'établit qu'à la condition d'appliquer la tension directe, c'est-à-dire





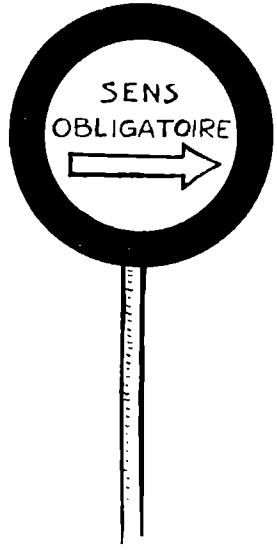
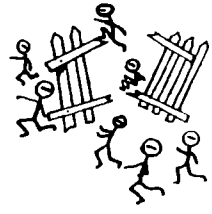


Fig. 17 (à gauche). — Intensité du courant inverse d'une jonction en fonction de la tension appliquée. Attention : les échelles ne sont pas linéaires (mais logarithmiques).

Fig. 18 (en haut, à droite). — La jonction N-P peut servir de redresseur de courant au même titre que la valve à vide et, de surcroît, sans exiger une tension de chauffage! Notre dessin montre le schéma du redresseur à une alternance.

Fig. 19 (en bas, à droite). — La diode à jonction N-P sert de détectrice. La tension détectée est recueillie sur une résistance et intégrée à l'aide d'un condensateur.



le pôle positif à la zone P et le pôle négatif à la zone N. Mais, si vous inversez les polarités, il n'y aura pas de courant ou, du moins, on aura un *courant inverse* extrêmement faible.

IG. — Même si l'on applique une tension élevée?

CUR. — Même en ce cas, mais seulement jusqu'à une certaine limite. Si vous la dépassez, la barrière de potentiel est rompue, et les électrons se précipitent en avalanche : d'un seul coup, le courant devient intense. Ce phénomène a été décrit par Zener, et la tension inverse à laquelle il se déclenche porte le nom de *tension de Zener*. Si l'on utilise ce phénomène dans certaines applications électroniques, nous n'aurons pas, pour notre part, à y faire appel. Et, pour nous, la jonction restera conductrice dans le sens direct et pratiquement isolante dans le sens inverse.

Sens unique obligatoire.

IG. — Mais alors, cette jonction, qui est conductrice à sens unique, constitue une véritable redresseuse?

CUR. — Mais oui, mille fois oui, mon cher Ignotus. Car si vous lui appliquez une tension alternative, le courant passera pour l'alternance directe, mais ne passera pas pour l'alternance inverse.

IG. — Comme dans n'importe quelle diode?

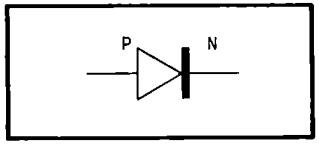
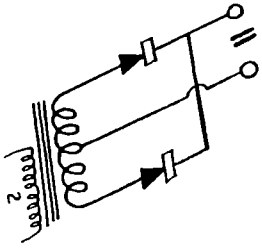


Fig. 20. — Le symbole de la diode à jonction adopte fort malencontreusement le sens conventionnel du courant : la flèche le fait, en effet, passer du positif au négatif, ce qui est contraire au véritable sens de la circulation des électrons...



CUR. — Parfaitement. Et c'est la raison pour laquelle on appelle aussi la jonction P-N, *diode* semiconductrice. Comme toute diode, elle peut servir de détectrice. Et elle s'acquitte parfaitement de cette fonction. Même mieux que les diodes à vide, lorsqu'il s'agit de courants de fréquences très élevées.

IG. — Et peut-on également utiliser les jonctions pour le redressement de courants relativement intenses, par exemple à la place des valves pour la tension anodique?

CUR. — Cela se fait couramment. Des redresseurs au silicium, à l'oxyde de cuivre ou au sélénium remplacent avantageusement les valves à vide. Ils sont plus robustes et ont une durée de vie bien plus élevée.

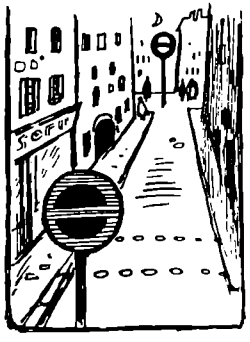
IG. — S'il en est ainsi, je n'hésite pas à crier : « Vivent les semiconducteurs! ».

Après avoir examiné, dans la dernière causerie, les propriétés des jonctions, nos deux amis abordent ici l'étude du transistor qui, dès ce premier contact, révèle de profondes similitudes et de non moins profondes différences avec le tube à vide. Curiosus et Ignotus démontent le mécanisme de l'amplification du transistor et font d'intéressantes constatations au sujet de ses impédances d'entrée et de sortie.

★ **SOMMAIRE : Transistors P-N-P et N-P-N. - Courant de repos. - Courant de base. - Effet transistor. - Amplification de courant. - Analogie tube-transistor. - Résistances d'entrée et de sortie. - Amplification de tension. - Alimentation du transistor.**

BONJOUR, TRANSISTOR !

Une stupide plaisanterie.



CURIOSUS. — Bonjour, Ignotus. Pourquoi arrivez-vous en retard et, de surcroît, avec cet air furibond?

IGNOTUS. — Il y a de quoi... Savez-vous que votre rue est devenue inaccessible aux automobiles?

CUR. — Elle est à sens unique. Mais il suffit d'y accéder dans le bons sens pour...

IG. — Il n'y a plus de bon sens! Des voyous, qui se croient sans doute très spirituels, ont placé à l'autre bout un pannonceau de sens interdit, en sorte que, maintenant, l'entrée de votre rue est interdite des deux côtés.

CUR. — Après tout, cette plaisanterie est peut-être le fait de quelqu'un qui était excédé par le bruit que font les voitures... Nous voilà donc tranquilles, ce qui nous permettra d'examiner enfin le principe du transistor.

IG. — J'ai hâte de savoir comment est faite cette « bête à trois pattes ».

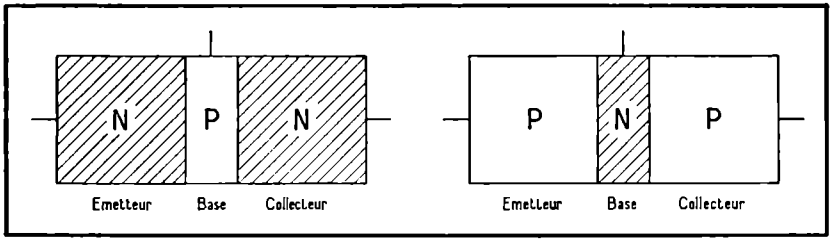
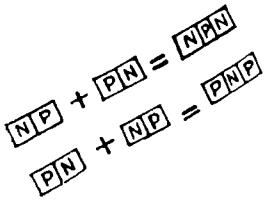


Fig. 21. — Deux types fondamentaux de transistors : N-P-N et P-N-P.

Cur. — Eh bien, cela n'a rien de compliqué. Un transistor se compose de deux jonctions, mises en opposition. On peut, par exemple, prendre une jonction N-P et une P-N, et, en rendant commune leur partie P, on obtient un transistor du type N-P-N.

Ig. — De même, je pense, une conjonction... des jonctions P-N et N-P donnerait lieu à un transistor P-N-P.



Cur. — Evidemment. J'ajouterai que l'une des zones extérieures porte le nom d'*émetteur* et l'autre celui de *collecteur*, alors que la zone médiane (qui doit être très mince, j'insiste là-dessus) est appelée *base*.

Ig. — En somme, un transistor est une sorte de sandwich où, entre deux gros morceaux de pain, on trouve une mince tranche de jambon.

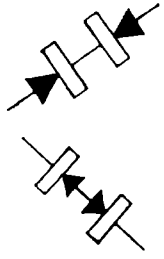
Cur. — Si vous voulez.

Ig. — Eh bien, laissez-moi vous dire que votre sandwich n'est pas plus comestible que n'est accessible votre rue.

Un sandwich impénétrable.

Cur. — Que voulez-vous insinuer, ami?

Ig. — Tout simplement que deux jonctions mises en opposition interdisent le passage du courant dans les deux sens, au même titre que les deux panneaux de « sens interdit » empêchent d'entrer dans votre rue, quelle que soit l'extrémité par laquelle on tente d'y accéder.



Cur. — Pas mal du tout, votre raisonnement. Vous finirez par me soupçonner d'être l'auteur de la stupide plaisanterie que j'aurais commise à seule fin de vous rendre plus aisée la compréhension du transistor... Le fait est que, si l'on applique une tension à un transistor, entre émetteur et collecteur, quelle qu'en soit la polarité, il y aura toujours l'une des deux jonctions qui sera placée dans le « bon sens » et ne demandera qu'à laisser passer le courant; mais l'autre sera dans le « mauvais sens » et s'opposera à son passage.

Ig. — Par exemple, si, à un transistor N-P-N, nous appliquons, à gauche, le négatif, et, à droite, le positif, la première jonction (N-P) laisserait bien passer les électrons de gauche à droite. Mais la seconde

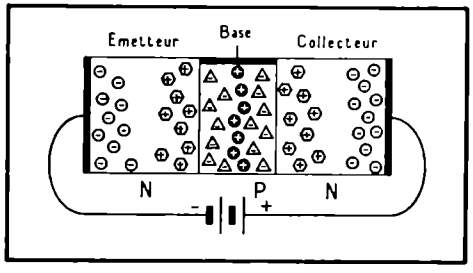


Fig. 22. — Barrières de potentiel que dressent, dans un transistor, les électrons, les lacunes et les ions positifs (ceux des donneurs) et négatifs (ceux des accepteurs).

(P-N) leur barrera résolument le chemin. N'y aura-t-il cependant pas quelques électrons débrouillards qui, malgré tout, parviendront à circuler?

Cur. — Oui, il y en a toujours. Ils se fraient le chemin à la faveur de l'agitation thermique, qui leur permet de franchir la barrière de potentiel de la jonction P-N. Cette circulation d'électrons forme ce que l'on appelle *courant initial* ou *courant de saturation*.

Ig. — Pourquoi cette dernière dénomination? Serait-il tellement intense?

CUR. — Au contraire : il est très faible. Mais il ne dépend guère de la valeur de la tension appliquée. Augmentez-la, le courant restera pratiquement le même. Par « saturation », on entend que la totalité des électrons libres, capables, à la température donnée, de franchir la barrière de potentiel, participent au courant ainsi désigné.

IG. — Mais si la température augmente...

CUR. — ... L'intensité du courant de saturation augmente aussi. Il peut, d'ailleurs, advenir que, sous une tension élevée, ce courant atteigne une valeur telle, qu'il provoque l'échauffement des jonctions, ce qui fait croître son intensité...

IG. — ... ce qui, à son tour, augmente l'échauffement, et ainsi de suite.

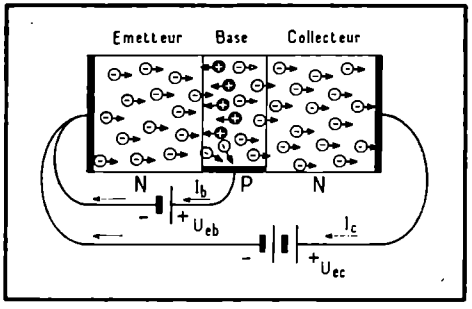
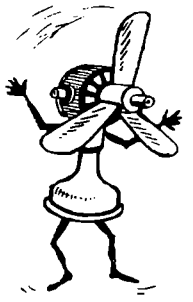


Fig. 23. — En attirant les électrons de l'émetteur vers la base, la source de tension U_{eb} leur a ouvert le chemin du collecteur.

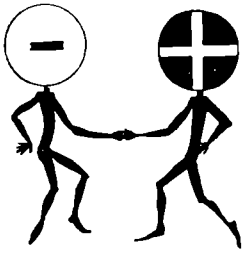


CUR. — Oui. On dit alors que le transistor s'est « emballé ». Et ce phénomène peut entraîner sa destruction. Aussi, convient-il de ne pas lui appliquer des tensions excessives et de faciliter l'évacuation de la chaleur.

IG. — Je vous promets d'installer des ventilateurs dans mes appareils à transistors... Mais, au demeurant, je ne vois pas l'utilité de ces semiconducteurs en forme de sandwiches.

A la base de tout... la base.

IG. — C'est parce que vous n'avez pas encore touché au jambon... je veux dire à la mince zone du milieu, comprise entre les deux jonctions et que nous avons appelée base. Appliquons maintenant une faible tension, en sens direct, entre l'émetteur et la base.



IG. — Vous voulez dire que, par exemple, dans le cas d'un transistor N-P-N, nous rendrons l'émetteur négatif par rapport à la base?

CUR. — Exactement. Que se produira-t-il alors, à votre avis?

IG. — Rien de bien particulier. Puisque la tension est appliquée dans le « bon sens », un courant s'établira à travers la jonction entre émetteur et base. Et c'est tout.

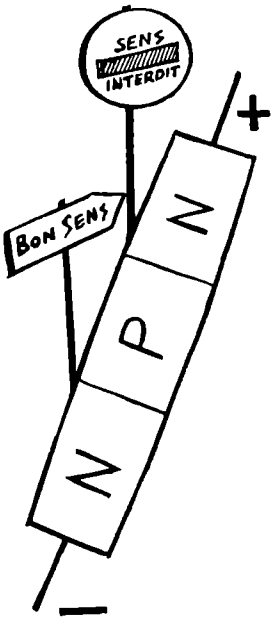
CUR. — Non, ce n'est pas tout. Car ce courant introduira dans la base P des électrons libres venant de l'émetteur qui est du type N. Et, comme la base est très mince, seule une faible quantité de ces électrons viendra combler les trous disséminés dans la zone P, en créant ainsi un *courant de base* I_b, selon le mécanisme que nous avons étudié la dernière fois, en examinant la jonction N-P. Cependant, la majeure partie de ces électrons pénétrant dans la base seront attirés par le potentiel positif du collecteur, beaucoup plus élevé que celui de la base. Ils franchiront

donc la barrière de potentiel de la deuxième jonction et, en traversant le collecteur, reviendront vers l'émetteur à travers la source de tension U_{cc}.

IG. — Formidable! Si je comprends bien, il suffit d'appliquer une petite tension entre base et émetteur pour faire franchir aux électrons cette deuxième jonction base-collecteur qui, normalement, se présente à eux dans le « mauvais sens ».

CUR. — Mais oui, Ignotus. Et c'est le déclenchement du courant inverse à travers la seconde jonction qui est le principe même de l'*effet transistor*.

IG. — Je pense que les choses seront pour moi plus claires, si vous me fixez sur l'ordre de grandeur des tensions et des courants mis en jeu.



Microampères de la base et milliampères du collecteur.

CUR. — Entre base et émetteur, dans des transistors ordinaires, on applique une tension de l'ordre de 0,1 à 0,2 V. Elle détermine un courant de base de 50 à 200 µA. Quant à la tension appliquée entre collecteur et émetteur, elle peut varier entre 4,5 et 9 V. Et le courant du collecteur est de l'ordre de 2 à 10 mA.

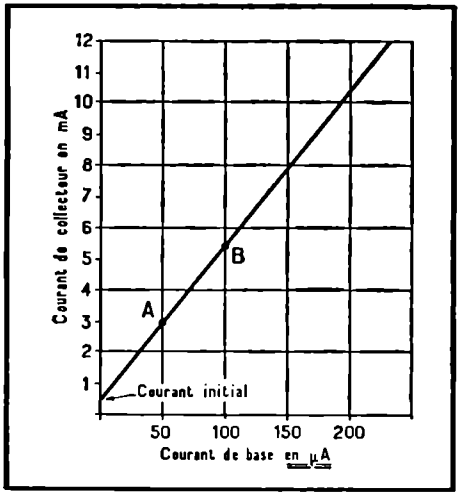
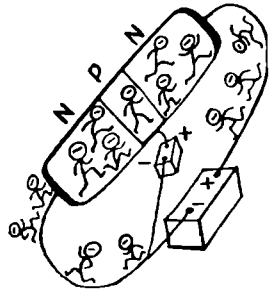


Fig. 24. — Variation du courant de collecteur I_c (en milliampères) en fonction du courant de base I_b (en microampères). Entre les points A et B, le courant de base passe de 50 à 100 µA, soit un accroissement de 50 µA ou 0,05 mA. Quant au courant de collecteur entre ces deux mêmes points, il passe de 3 à 5,5 mA, soit un accroissement de 2,5 mA. Le gain, en courant, du transistor, est donc égal à 2,5 : 0,05 = 50 fois.



IG. — En somme, l'émetteur fait entrer dans la base un certain nombre d'électrons, dont une faible partie retourne aussitôt à travers la source de tension U_{eb} vers l'émetteur. Ce sont les électrons qui, pendant leur court trajet dans la base, ont eu le malheur de rencontrer des trous. Mais la plupart poursuivent leur chemin en traversant la seconde jonction, et, entrés dans le collecteur, retournent vers l'émetteur à travers la source de tension U_{cc}. Je devine déjà que l'effet amplificateur du transistor consiste dans le fait que le courant de collecteur est bien supérieur à celui de base.

CUR. — Vous allez un peu trop vite, mais vous n'avez pas tort. Le fait est que le courant de collecteur dépend essentiellement du courant de base et varie en proportion. En général, il lui est plusieurs dizaines de fois supérieur. Voici, par exemple, une courbe montrant comment le courant de collecteur varie en fonction du courant de base, dans un certain modèle de transistor. Attention, Ignotus! Le courant de base

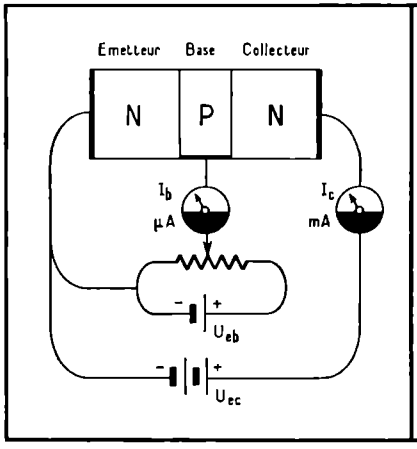


Fig. 25. — Montage ayant permis de relever la courbe de la figure 24. Pour chaque position du potentiomètre, on relève les valeurs des courants de base et de collecteur.

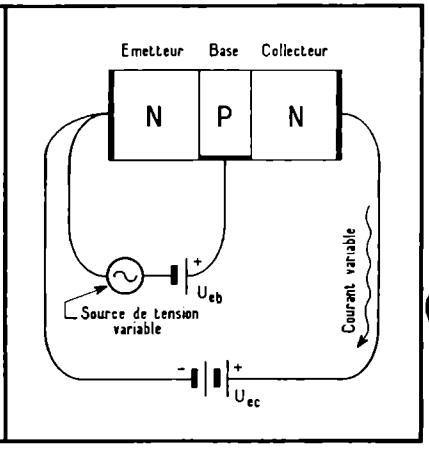
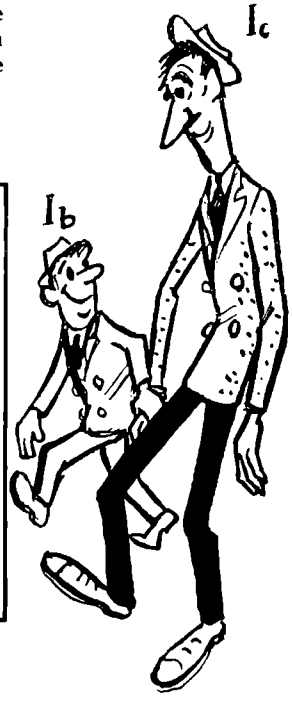


Fig. 26. — Et voici une tension variable appliquée entre base et émetteur. Du coup, le courant de collecteur devient, lui aussi, variable.

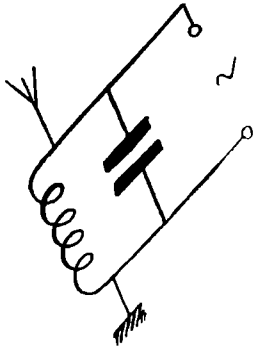


est ici représenté en *micro*-ampères, alors que celui du collecteur est en *milli*-ampères. Vous constatez qu'ici le courant de collecteur est toujours cinquante fois supérieur à celui de base (abstraction faite du faible courant initial qui existe en l'absence de courant de base). On dit alors que l'*amplification du courant* est ici égale à cinquante.

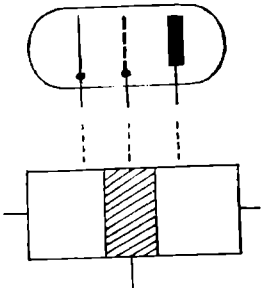
IG. — Et comment relève-t-on une telle courbe?

CUR. — En rendant variable la tension appliquée entre base et émetteur, à l'aide, par exemple, d'un diviseur de tension, vulgairement appelé potentiomètre. On mesure alors le courant de base à l'aide d'un microampèremètre, et celui de collecteur, à l'aide d'un milliampèremètre.

IG. — J'ai une idée, Curiosus. Si, au lieu de tourner le bouton d'un potentiomètre, on faisait varier la tension entre émetteur et base, en appliquant, en série avec la source de tension continue, un signal variable, par exemple la tension de haute fréquence provenant d'un collecteur d'ondes ou bien la tension de basse fréquence obtenue après la détection... En faisant ainsi subir des faibles variations au courant de base, on obtiendrait de fortes variations du courant de collecteur.



Similitudes et différences.



Cur. — Bravo, Ignotus! Vous brûlez les étapes de mes explications. Comment avez-vous eu cette idée lumineuse?

Ig. — Parce que, depuis un moment, j'entrevois l'analogie entre le transistor et le tube électronique. Cette base ressemble bigrement à la grille. Et, comme celle-ci, elle est interposée entre émetteur et collecteur, *alias* entre cathode (elle aussi émettrice d'électrons) et anode (elle aussi collectrice d'électrons). Et, comme de faibles variations de potentiel sur la grille entraînent de fortes variations du courant anodique, ici, de faibles variations de potentiel de la base déterminent de fortes variations du courant de collecteur. Hourrah! J'ai compris le transistor!!! Ne suis-je pas quelqu'un de formidable?

Cur. — Vous avez surtout le triomphe modeste. Cependant, au risque de verser une douche froide sur votre juvénile enthousiasme, je dois vous dire que l'analogie tube-transistor, tout en facilitant bien la compréhension de certaines choses, a des limites qu'il ne faut pas outrepasser.

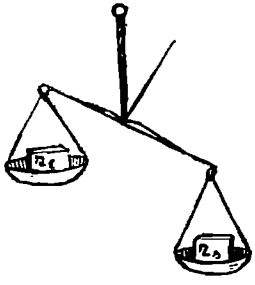
Ig. — Je ne vois pas de différence essentielle.

Cur. — Pour commencer, il en est une de taille : c'est l'existence du courant de base. Souvenez-vous! Lorsque nous utilisons des tubes à vide, nous évitons soigneusement d'avoir un courant de grille.

Ig. — C'est exact. Nous polarisons négativement la grille pour l'empêcher de devenir positive aux pointes des alternances positives du signal, ce qui la rendrait concurrente de l'anode, en lui faisant capter des électrons.

Cur. — Par conséquent, le signal d'entrée d'un tube est une tension qui n'a à créer aucun courant, donc à ne dépenser aucune puissance. Mais, dans le cas du transistor, le signal d'entrée est une tension suscitant un courant de base. Il y a donc là une puissance mise en jeu.

Ig. — Dois-je en conclure que la *résistance d'entrée* du transistor, c'est-à-dire la résistance émetteur-base, est faible?



Cur. — Evidemment. Elle n'est que de quelques centaines d'ohms, alors que, dans un tube à vide, entre la cathode et la grille, elle est infinie. Et, dans les transistors de puissance, cette résistance n'est que de quelques ohms ou dizaines d'ohms. En revanche, la *résistance de sortie* est assez élevée et peut atteindre plusieurs dizaines de milliers d'ohms (1).

---

(1) Les résistances dont parle Curiosus sont calculées en divisant une faible variation d'une tension par la variation du courant correspondant qu'elle détermine. Ainsi, la *résistance d'entrée*

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

où ΔE_b est une faible variation de la tension entre émetteur et base, et ΔI_b la variation du courant de base résultante. De même, la *résistance de sortie*

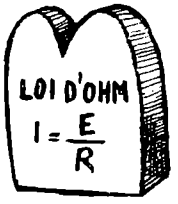
$$r_s = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

où ΔE_c est une faible variation de la tension appliquée entre collecteur et émetteur, alors que ΔI_c est la variation correspondante du courant de collecteur.

IG. — C'est normal, puisque les tensions sont appliquées dans le sens direct pour la jonction émetteur-base, ce qui en réduit la résistance, mais en sens inverse pour la jonction base-collecteur, ce qui doit rendre sa résistance très forte. Ici, cependant, les ordres de grandeur sont ceux des tubes électroniques, où la résistance de sortie est relativement faible, surtout dans les triodes.

CUR. — Vous voyez donc, Ignotus, qu'il ne faut pas recourir, sans une certaine réserve, à l'analogie tube-transistor. Et, puisque nous avons abordé la question fondamentale des résistances (ou, mieux, impédances) d'entrée et de sortie, vous comprendrez aisément comment le transistor effectue l'amplification de tension.

Amplification de tension.

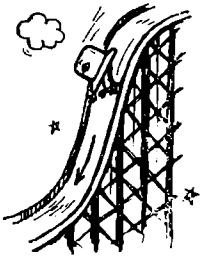


IG. — Je suppose qu'une faible tension alternative, appliquée entre base et émetteur, déterminera des variations du courant de base, comme nous l'avons déjà dit.

CUR. — Et ces variations seront d'autant plus importantes que la résistance d'entrée est plus faible (en supposant que la source de tension ait elle-même une faible résistance interne).

IG. — Je comprends cela, car j'ai toujours présente à l'esprit la loi d'Ohm, qui veut que l'intensité du courant soit d'autant plus grande que la résistance est plus faible.

CUR. — Or, le courant du collecteur varie proportionnellement au courant de base. Il en résulte donc de fortes variations de ce courant. Et, comme la résistance de sortie du transistor est élevée, nous pouvons, sans inconvénient, faire passer ce courant par une résistance de charge de forte valeur...



IG. — ... sur laquelle nous allons ainsi recueillir des tensions alternatives bien amplifiées. Si ma mémoire est bonne, dans les tubes électroniques, le rapport d'une faible variation du courant anodique à la variation de tension de grille qui l'a causée, porte le nom de *pente*. Peut-on, dans le royaume des transistors, appliquer la même notion? La pente serait alors le rapport de la variation du courant de collecteur à la variation de la tension de base.

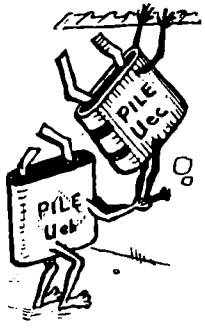
CUR. — Mais oui, Ignotus. On parle couramment de la pente d'un transistor. Et nous aurons l'occasion d'examiner cette notion de près. D'ores et déjà, je peux vous dire qu'une pente de 30 mA/V (pour une courant de collecteur de 1 mA, car sa valeur varie avec celle de ce courant) n'a rien de surprenant.

IG. — Mais, c'est formidable! On doit obtenir des amplifications énormes avec une telle pente.

CUR. — Hélas! non. Car, vous le verrez bientôt, la faible résistance d'entrée nous fait perdre une partie du bénéfice de ces pentes élevées. D'autre part, vous concevez qu'il faut limiter l'amplitude des tensions alternatives ainsi mises en jeu.

IG. — Dans les tubes à vide, on doit éviter que la grille devienne positive. Ici, je pense, il faut éviter que les crêtes des alternances positives ne rendent l'émetteur positif par rapport à la base.

CUR. — Il ne faut pas davantage que les crêtes des alternances négatives sur la résistance de charge dépassent la tension positive appliquée au collecteur et le rendent négatif.



IG. — Pour éviter ces dangers, ne pourrait-on pas accroître la valeur des deux tensions d'alimentation?

CUR. — Ce serait, dans certains cas, imprudent, car, pour chaque modèle de transistor, il y a des valeurs des tensions continues à ne pas dépasser. Et, à cette occasion, je vous signale que les deux sources de tension peuvent être avantageusement mises en série, puisqu'il s'agit

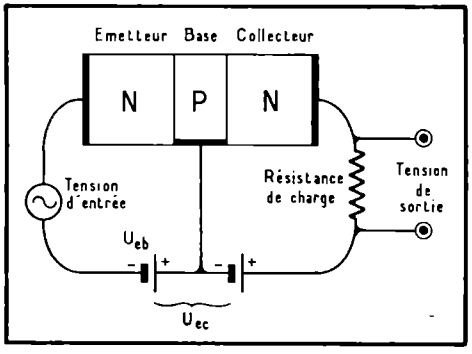
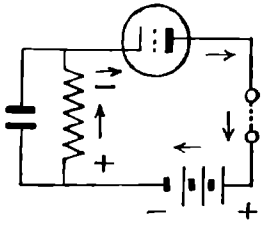


Fig. 27. — Les deux sources de tension, celle de la base et celle du collecteur, peuvent être remplacées par une seule comportant une prise (comme ci-contre) ou bien un diviseur de tension. Notre dessin montre, en même temps, l'emplacement de la résistance de charge sur laquelle on prélève les tensions de sortie.

de porter le collecteur à une tension encore plus positive que celle de la base par rapport à l'émetteur.



IG. — Je vois, la pile U_{eb} fait la courte échelle à la pile U_{ec}.

CUR. — En réalité, on se passe complètement de la première de ces piles, et l'on obtient la polarisation de la base, en déterminant, dans une résistance, une chute de tension, par le courant émetteur-collecteur qui y passe.

IG. — Comme on le fait dans les montages à tubes, où la résistance de polarisation de grille est parcourue par le courant anodique.

CUR. — Oui. Mais nous examinerons cette question plus tard. En attendant et à titre d'exercice, je vous demanderai de réfléchir, d'ici notre prochaine rencontre, à la façon dont se comporte le deuxième type de transistors : le P-N-P, qui est, de loin, le plus répandu.

IG. — Que de nuits blanches en perspective, pauvre de moi!

Au cours de leurs trois premières conversations, Curiosus et Ignotus ont examiné les bases physiques des transistors. A cette fin, ils ont exploré la structure intime de l'atome, puis son comportement social dans les réseaux cristallins. Ils ont vu quels troubles sont causés dans ces sociétés d'atomes par l'intrusion des impuretés. Et, enfin, en assemblant des semi-conducteurs contenant des impuretés de propriétés opposées, nos amis ont obtenu des diodes et des transistors.

Tout cela, pour être bien assimilé, mérite un retour en arrière. Ce sera l'objet de la causerie que l'on va lire.

★ **SOMMAIRE : Mouvement des charges. - Porteurs majoritaires. - Fonctionnement du transistor P-N-P. - Combinaisons intermétalliques. - Repérage des connexions. - Symboles du transistor. - Résumé des notions fondamentales.**

LA PHYSIQUE DES TRANSISTORS

Quatre sortes de particules chargées.

IGNOTUS. — Vos semiconducteurs me font passer des nuits blanches, Curiosus. C'est passionnant... mais bougrement compliqué!

CURIOSUS. — Dois-je vous administrer des somnifères ou préférez-vous que j'éclaircisse les points qui vous paraissent obscurs?

IG. — J'aime mieux avoir des réponses aux questions qui me tourmentent. Voyez-vous, ce qui brouille, pour moi, l'aspect de certains phénomènes, c'est la présence, dans les semiconducteurs, de quatre espèces de particules chargées :

1) Les *atomes ionisés des donneurs*, qui, après avoir perdu le cinquième électron de leur couche extérieure, sont devenus *positifs;*

2) Les *électrons* ainsi libérés, qui, bien entendu, sont *négatifs;*

3) Les *atomes ionisés des accepteurs*, qui, ayant accaparé un électron d'un atome voisin, pour compléter leur couche extérieure à quatre, sont, de ce fait, devenus *négatifs;*

4) Enfin, ces *trous* ou *lacunes*, dus à de tels accaparements et où le manque d'un électron équivaut à une charge *positive*.

CUR. — Vous avez fort bien résumé la situation qui règne au sein d'un semiconducteur. Qu'est-ce donc qui vous inquiète?

IG. — C'est la question du mouvement des charges. Vous m'avez dit que le courant électrique, dans le semiconducteur, est dû, à la fois, au flux des électrons allant du pôle négatif vers le pôle positif et au cheminement des « trous » qui, en sens inverse, vont du pôle positif vers le pôle négatif. En cela, les semiconducteurs diffèrent des métaux, où la conduction est due uniquement au mouvement des électrons.

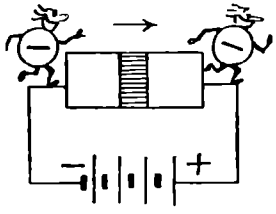
CUR. — Tout à fait exact, encore que le mouvement des « trous » soit, lui aussi, en dernier ressort, dû au déplacement des électrons.

IG. — Mais je ne comprends pas pourquoi les atomes ionisés, aussi bien ceux des donneurs que ceux des accepteurs, ne participent pas, eux aussi, au mouvement des charges électriques.

CUR. — Je vois ce qui vous tourmente. Et vous avez raison de poser la question. C'est pourtant simple : ces atomes ne peuvent pas se déplacer, parce qu'ils font partie d'un réseau cristallin, et, de ce fait, sont solidement et rigidement attachés à leurs places. Tant qu'un corps reste solide, ses atomes demeurent prisonniers de ces liens invisibles qui les maintiennent à leur place. Par contre, dans les liquides, les atomes ionisés se déplacent librement, et le courant se propage par conduction ionique, donnant lieu à des phénomènes d'électrolyse, dont vous a sans doute parlé votre cours de physique.

IG. — Eh bien, ce que vous me dites me fait plaisir. Désormais, dans mes raisonnements, je pourrai donc faire abstraction des atomes ionisés et ne m'occuper que des électrons et des trous.

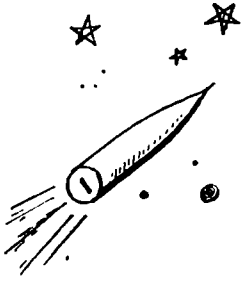
CUR. — Ce sera parfaitement légitime. Et j'ajouterai qu'il est heureux que les ions ne se déplacent pas dans les semiconducteurs. Sinon, il y aurait eu, peu à peu, épuisement de matière conductrice, ce qui abrégerait la vie des transistors. En revanche, la provision d'électrons se renouvelle constamment, puisque la source de tension en injecte d'un côté et en absorbe de l'autre (ce qui donne naissance à de nouveaux « trous »). C'est vous dire que rien ne vient limiter la longévité des transistors.



Einstein avait raison.

IG. — C'est merveilleux... Mais ne lâchons pas nos électrons et lacunes. Je voudrais savoir comment ils coexistent sans toujours se neutraliser. Puisque les charges de noms contraires s'attirent mutuellement...

CUR. — Songez, Ignotus, aux énormes distances qui (à l'échelle atomique, bien entendu) séparent la plupart de ces particules. Un électron parvient à parcourir des trajets d'une longueur égale à plusieurs centaines de fois la distance séparant entre eux des atomes. Ce n'est, à l'échelle humaine, qu'un dix-millième de millimètre en moyenne. Mais pour l'électron, c'est une aventure aussi folle que le voyage interstellaire d'une future fusée spatiale. Vous concevez que, dans ces conditions, les chances qu'il a de rencontrer une lacune ne sont pas énormes. En fait, électrons et lacunes coexistent toujours.



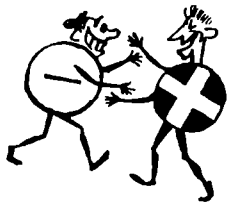
IG. — Oui, vous m'avez expliqué que, même à la température normale, il y a une certaine agitation thermique qui arrache des électrons à de nombreux atomes, pour les projeter dans l'espace inter-atomique.

CUR. — Dans un centimètre cube de germanium « pur », il y a toujours quelque vingt-cinq mille milliards d'électrons libres et, évidemment, autant de « trous », car la place laissée par le départ d'un électron est un « trou ». Ces paires de porteurs de charges se recombinent après une certaine durée de vie, mais d'autres paires se créent, en sorte qu'un équilibre statistique s'y maintient.

IG. — Et si le germanium n'est pas « pur »? Si nous y introduisons, par exemple, des impuretés du type N?

CUR. — Il y aura alors davantage d'électrons libres que de trous. Et ces électrons constitueront des *porteurs de charges majoritaires*.

IG. — Je devine que, dans un semiconducteur du type P, ce sont les lacunes qui sont les plus nombreuses et, de ce fait, doivent être considérées comme porteurs majoritaires... Décidément, Einstein avait raison. Tout est relatif et tout n'est que question de proportions.



Le mécanisme du P-N-P.

CUR. — Maintenant que j'ai satisfait votre curiosité, pourriez-vous, à votre tour, répondre à la question que je vous ai posée à la fin de notre dernière causerie : comment fonctionne le transistor P-N-P?

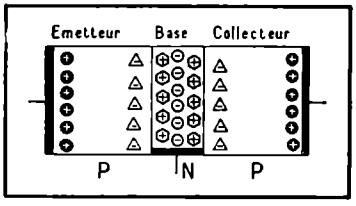
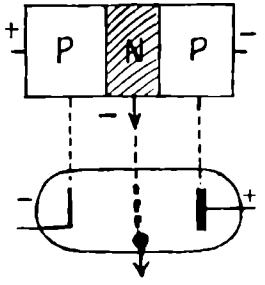


Fig. 28. — Répartition des porteurs des charges (électrons et lacunes) et des atomes ionisés dans un transistor P-N-P avant l'application des tensions d'alimentation. On voit les barrières de potentiel formées par des ions de signes opposés.

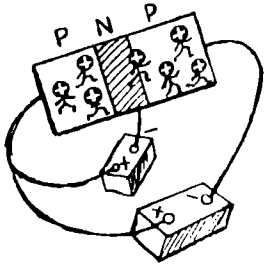


IG. — J'y ai réfléchi et je crois pouvoir vous le dire. Dans un tel transistor, contrairement à ce que l'on fait pour le N-P-N, le collecteur devra être rendu négatif par rapport à l'émetteur. Je vous avoue que cela m'est très désagréable.

CUR. — Pourquoi donc?

IG. — Parce que j'ai tendance à comparer toujours le transistor à une triode. Et l'idée d'une anode rendue négative par rapport à la cathode, — car tels sont les rôles respectifs du collecteur et de l'émetteur, — cette idée me défrise quelque peu. En revanche, savoir que la base doit être, elle aussi, négative par rapport à l'émetteur, réjouit mon cœur, car je pense, bien entendu, à la grille.

CUR. — Méfiez-vous, Ignotus, de ces rapprochements, je vous l'avais déjà dit.



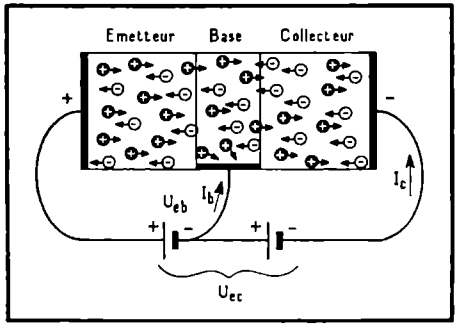


Fig. 29. — Mouvement des porteurs des charges dans un transistor P-N-P en fonctionnement. Pour plus de clarté, les ions ne sont pas figurés dans ce dessin.

IG. — Quoi qu'il en soit, avec des tensions ainsi réparties, la jonction émetteur-base est alimentée dans le « bon sens ». C'est dire que, repoussés par le pôle positif de la source d'alimentation, les « trous » de l'émetteur se précipiteront impétueusement, à travers la jonction P-N, vers la base. Et leur élan sera tel que, incapables de répondre à l'appel du pôle négatif de la batterie U_{eb} relié à la base, la plupart traverseront sa faible épaisseur pour pénétrer dans le collecteur.

Cur. — C'est tout à fait exact. Cependant, que deviennent les rares « trous » qui, comme vous dites, répondent à l'appel du pôle négatif de la batterie U_{eb}?

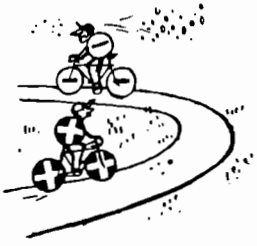
Ig. — Ceux-là sont neutralisés en se recombinant avec des électrons émanant de ce pôle. Et ils donnent ainsi lieu à un faible courant I_b, circulant de la base vers l'émetteur (au sens électronique, bien entendu).

Cur. — Et quel est le sort de la majorité des lacunes ayant atteint le collecteur?

Ig. — Là se produit le même phénomène : elles sont neutralisées par des électrons émanant du pôle négatif de la batterie U_{ec}, qui les appelle puissamment. Et, chaque fois qu'un électron aura ainsi pénétré de la batterie dans le collecteur, pour se combiner avec un « trou », un autre électron quittera un des atomes de l'émetteur, pour être aspiré par le pôle positif de cette batterie; bien entendu, en quittant son atome, l'électron en question donne naissance à un nouveau « trou ». Et ainsi, le courant est maintenu par la double circulation des « trous » (ou lacunes) de l'émetteur vers le collecteur, et des électrons en sens inverse. Est-ce exact?

Cur. — Je suis ravi de constater que vous avez parfaitement saisi le mécanisme du transistor. En effet, tout se passe comme lorsqu'une armée entreprend l'assaut d'une forteresse. Les combattants atteignent le glacis et le franchissent, dans un irrésistible élan, en forçant le rang des défenseurs qui tentent de les contenir.

Ig. — Votre analogie, où le glacis représente la base et la forteresse le collecteur, serait plus convaincante si la garnison assiégée tentait une contre-attaque symbolisant le mouvement des électrons allant à la rencontre des « trous » assaillants, dont la charge... est positive et irrésistible. Et, à ce propos, les électrons et les lacunes sont-ils animés de mêmes vitesses?



Quelques combinaisons futuristes.

Cur. — Non, Ignotus. Dans du germanium pur, sous l'action d'un champ électrique d'un volt par centimètre, les électrons parcourent une quarantaine de mètres par seconde, alors que les lacunes se déplacent deux fois plus lentement. Dans du silicium, la vitesse des électrons est, dans les mêmes conditions, de douze mètres par seconde, et celle des trous de seulement deux mètres et demi par seconde. En revanche, dans certaines combinaisons *intermétalliques*, les électrons atteignent des vitesses de plus d'un demi-kilomètre par seconde.

Ig. — Qu'est-ce que ces combinaisons intermétalliques que vous me mettez subitement sous le nez?

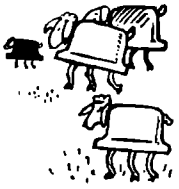
Cur. — Ce sont des semiconducteurs, obtenus par une combinaison d'éléments trivalents et pentavalents...

Ig. — ... ce qui fait, en moyenne, entre trois et cinq, des éléments de valence quatre, c'est-à-dire aussi tétravalents que le germanium et le silicium. Pouvez-vous m'en nommer quelques-unes?

Cur. — Oui, par exemple la combinaison du gallium trivalent et de l'antimoine pentavalent, qui permet de réaliser des transistors. Ou bien l'indium trivalent, combiné avec du phosphore pentavalent, forme un semiconducteur utilisé dans certaines diodes. On a même réussi à mettre à profit une combinaison de cadmium (valence deux) et de sélénium (valence six), pour faire des cellules photo-électriques. Le domaine

des semiconducteurs intermétalliques fait l'objet d'actives recherches et ouvre d'intéressantes perspectives d'avenir.

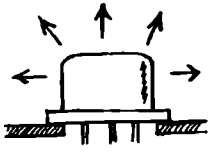
IG. — Vous parlez comme un livre, cher ami. Mais revenons au présent et à nos moutons... à trois pattes. Je voudrais savoir ce qui différencie un émetteur d'un collecteur. Dans un transistor P-N-P, tous les deux sont du type P (comme dans un N-P-N, ils sont tous deux du type N). Dès lors, ne sont-ils pas interchangeables?



CUR. — Non, cher ami. Et vous le comprendrez aisément. Si le courant allant de l'émetteur vers la base, puis, de là, vers le collecteur, est sensiblement le même, les tensions sont assez différentes. Faible entre base et émetteur, la tension est bien plus élevée entre collecteur et base.

IG. — J'y suis! Comme le produit d'un courant par une tension est une puissance, celle dissipée du côté du collecteur est plusieurs fois supérieure à celle que l'on trouve entre émetteur et base.

CUR. — Vous avez mille fois raison. Voilà pourquoi le collecteur doit pouvoir, plus aisément, évacuer la chaleur qui s'y développe. Sa surface est plus grande que celle de l'émetteur. Et, dans les transistors de puissance, le collecteur est soudé au boîtier métallique, ce qui permet de rayonner la chaleur et de la transmettre par conduction au châssis.



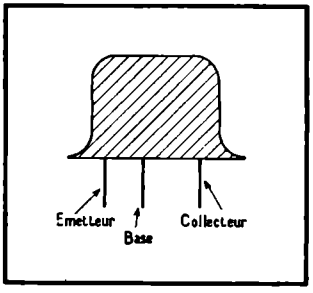
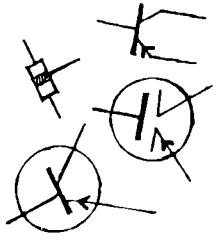


Fig. 30. — Disposition des trois « pattes » d'un transistor permettant de repérer aisément l'émetteur, la base et (plus loin) le collecteur.

IG. — Je comprends maintenant comment on différencie les « électrodes » du transistor. Mais comment les reconnaît-on? Comment sait-on que telle connexion du transistor mène vers son émetteur, que telle autre correspond à sa base ou à son collecteur?

De pattes et de pointes.



CUR. — Le repérage est très facile. Les trois fils (car le minuscule transistor n'a ni culot ni broches) sont disposés en ligne. Deux fils sont rapprochés, c'est l'émetteur et la base. Le troisième, plus éloigné, est celui du collecteur. (Celui-ci peut également être repéré par un point de couleur.)

IG. — C'est, en effet, à la fois simple et logique, comme ce symbole du transistor qu'est, dans vos dessins, le bâtonnet divisé en trois zones.

CUR. — Hélas! Ignotus, ce symbole, qui, effectivement, est logique et correspond à la véritable structure du transistor, n'est pas celui que l'on emploie habituellement dans les schémas.

IG. — Dommage! Et quel est donc le signe graphique « officiel » représentant le transistor?

CUR. — Il n'y a pas de symbole universellement adopté, les signes variant d'un pays à l'autre et même d'un auteur à l'autre. Mais la plupart ont cette forme : un trait avec deux autres venant le frapper au centre. Le trait en question est la base. Celui qui vient le rejoindre au milieu, et qui est pourvu d'une flèche, est l'émetteur. L'autre est le collecteur. Et — retenez bien ceci — quand la flèche est orientée *vers* la base, c'est le type P-N-P. Si elle *part* de la base, c'est un N-P-N.

IG. — Pourquoi, diable, avoir adopté un signe aussi peu conforme à la vraie architecture du transistor, où émetteur et collecteur se trouvent de part et d'autre de la base?

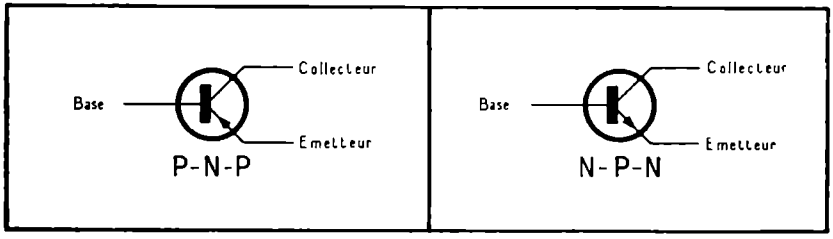
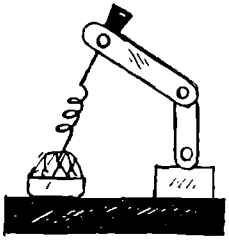


Fig. 31. — Symbole fréquemment utilisé pour les transistors des types P-N-P et N-P-N.



CUR. — C'est là le vestige de cette époque préhistorique qui remonte à 1948. Les premiers transistors, qui faisaient alors leur entrée dans le monde, étaient du type « à pointes ». Ils étaient formés par un cristal de germanium du type N, jouant le rôle de base, sur lequel s'appuyaient des pointes métalliques, très près l'une de l'autre.

IG. — Mais, Curiosus, n'était-ce pas un retour vers le vieux détecteur à galène?

CUR. — Presque. Mais à la place d'un seul chercheur, il y en avait deux. Et on alimentait un tel transistor comme un modèle P-N-P actuel. Le défaut du transistor à pointes est son manque de stabilité, comme

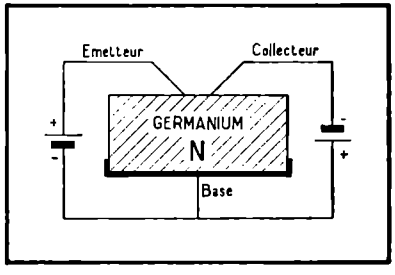


Fig. 32. — Composition du transistor à pointes.

celui de son ancêtre, le détecteur à galène. De surcroît, il ne permet pas de mettre en œuvre des puissances tant soit peu importantes. Voilà pourquoi on ne s'en sert guère plus (alors que la diode à pointe est toujours utilisée, en particulier dans le domaine des fréquences très élevées, comme celles mises en jeu dans le radar, car la très faible capacité qu'elle présente y est très appréciée).

IG. — En somme, le symbole actuel est un vestige d'une époque révolue?

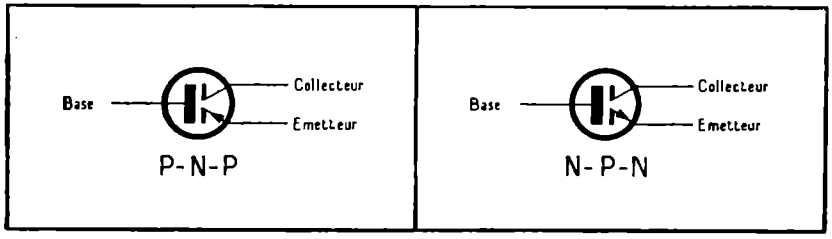


Fig. 33. — Symboles pouvant désigner plus spécialement les transistors à jonctions.

CUR. — Exactement. Notez, toutefois, qu'afin de distinguer du transistor à pointes le modèle actuel à jonctions, de nombreux auteurs utilisent pour ce dernier un symbole spécial.

IG. — Avant d'aller plus loin, Curiosus, je voudrais vous demander de résumer brièvement pour moi, de préférence par écrit, l'essentiel de ce que vous m'avez jusqu'à présent appris et dont j'aurai besoin pour comprendre la suite de vos explications. Cela me permettra de le mieux assimiler avant notre prochaine rencontre.

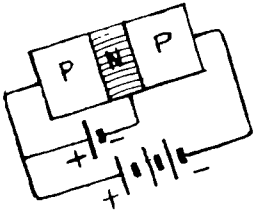
CUR. — C'est bien volontiers que je vais rédiger pour vous un tel résumé et vous l'adresserai par la poste. En attendant, bonne nuit, Ignotus.

LETTRE DE CURIOSUS A IGNOTUS

Voici, mon cher ami, les choses que vous devez graver dans votre mémoire :

★ *Un transistor se compose de trois zones appelées émetteur, base et collecteur. Elles contiennent des impuretés qui confèrent à l'émetteur et au collecteur des propriétés électriques (positives P ou négatives N) opposées à celles de la base.*

★ *Il existe donc deux catégories de transistors : P-N-P et N-P-N. La première est la plus répandue, du moins dans le cas du germanium. (Pour des raisons technologiques, la majeure partie des transistors au silicium sont du type N-P-N.)*



★ *Dans le modèle P-N-P, la base doit être rendue négative par rapport à l'émetteur; et le collecteur doit être encore plus négatif que la base.*

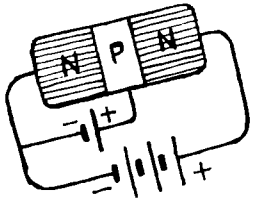
★ *Dans le modèle N-P-N, la base est plus positive que l'émetteur et le collecteur encore plus positif que la base.*

★ *On remarque que, dans les deux cas, les tensions appliquées alimentent la jonction émetteur-base dans le sens de la conduction.*

★ *Le courant de base est très faible (des* microampères*). Celui de collecteur est bien plus intense (des* milliampères*).*

★ *Une faible variation du courant de base détermine une forte variation du courant de collecteur. Le rapport de cette dernière à la première est appelé amplification de courant.*

★ *L'entrée du transistor (base-émetteur) présente une résistance relativement faible. Aussi les signaux appliqués à l'entrée doivent-ils dissiper une certaine puissance.*



★ *La sortie du transistor (collecteur-émetteur) présente une résistance élevée.*

★ *Une variation de tension appliquée entre base et émetteur détermine une variation du courant de base; celle-ci provoque une plus forte variation du courant de collecteur. Et si une résistance de charge est intercalée dans le circuit du collecteur, on peut y recueillir des variations de tension amplifiées.*

Voilà, mon cher Ignotus, en peu de mots, les conclusions auxquelles nous avons abouti.

Votre dévoué ami

CURIOSUS.

Certes, Ignotus n'aura pas à fabriquer lui-même des transistors. N'empêche qu'il a tout intérêt à connaître les procédés, assez particuliers, il faut le dire, qui permettent de réaliser nos « bêtes à trois pattes ». Chemin faisant, il constatera qu'il en existe plusieurs variétés conçues pour mieux assumer les diverses tâches dont elles peuvent être chargées. C'est ainsi que les problèmes de fréquences et de puissances toujours plus élevées ont conduit les techniciens à adopter certaines solutions particulières.

★ **SOMMAIRE : Purification par fusion de zones. - Chauffage électronique. - Tirage d'un monocristal. - Son découpage. - Méthode des jonctions tirées. - Transistors par alliage. - Le problème des transistors de puissance. - Procédé de diffusion. - Temps de transfert. - Rôle de la capacité émetteur-collecteur. - Transistor-tétrode. - Transistors à couche de barrage. - Méthode de double diffusion. - Transistor « drift ». - Modèle P-N-I-P. - Transistor mesa. - Dispositifs à effet de champ.**

UN PEU DE TECHNOLOGIE

Purification initiale.

IGNOTUS. — Vous savez, Curiosus, que je n'ai jamais tenté de fabriquer moi-même des tubes électroniques. La nécessité du vide poussé à créer dans l'ampoule a toujours été pour moi un obstacle insurmontable, car ma pompe à bicyclette ne me paraît pas être l'outil adéquat... En revanche, je pense pouvoir sans difficulté fabriquer quelques transistors pour mon propre usage. Croyez-vous que je trouverai en pharmacie les ingrédients dont j'aurai besoin : du germanium pur, de l'antimoine pour la zone N et de l'indium pour P?

CURIOSUS. — Mon pauvre ami, parlez-vous sérieusement?

IG. — Mais oui. Est-ce tellement difficile?

CUR. — Oh combien!... Tout d'abord, il faut purifier suffisamment le germanium, car celui qui, sous le qualificatif de « pur », est vendu dans le commerce, ne l'est point suffisamment pour nous. Ensuite, il faut lui conférer la structure cristalline régulière en le transformant en un cristal unique ou *monocristal*. Puis, il faut introduire les impuretés des types P et N en créant les deux jonctions séparant les trois zones du transistor. Enfin, il faut établir des connexions avec ces trois zones, monter le tout rigidement et le mettre à l'abri en l'enfermant dans un boîtier étanche. Seules les grandes usines parfaitement équipées parviennent à réaliser correctement ces diverses opérations.

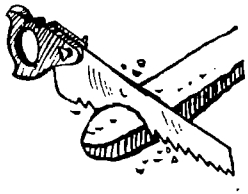
IG. — Vous me découragez. Est-ce donc vraiment si difficile de purifier le germanium?

Cur. — N'oubliez pas que nous avons besoin d'un germanium vraiment pur où, pour un milliard d'atomes, il ne doit pas avoir plus de 10 atomes d'impuretés et même moins d'un dans certains cas.

Ig. — Je suppose qu'on emploie des procédés chimiques pour débarrasser ainsi le germanium des corps étrangers qui le polluent.

Cur. — La chimie fait ce qu'elle peut. Mais c'est insuffisant. Aussi fait-on ensuite appel à un procédé physique appelé *fusion de zones* où l'électronique a son mot à dire. On met du germanium à purifier dans un long creuset très propre, en quartz ou en graphite, et, dans une atmosphère d'hydrogène ou d'azote (pour éviter toute oxydation), on chauffe une zone étroite de germanium en la faisant fondre. Et cette zone de fusion est lentement déplacée d'une extrémité à l'autre du creuset.

Ig. — Je suppose que, de la sorte, les impuretés sont brûlées.



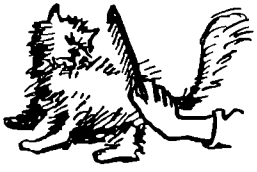
Cur. — Vous vous trompez. Le procédé est fondé sur le fait que les impuretés tendent à rester dans la zone liquéfiée, quittant ainsi les parties du germanium qui, en refroidissant, commencent à se solidifier. On les fait donc ainsi peu à peu passer d'une extrémité à l'autre de la masse du germanium et, après avoir recommencé l'opération plusieurs fois, on coupe le bout du germanium vers lequel toutes les impuretés ont été balayées.

Ig. — Et on le jette?

Cur. — Non. Car le germanium coûte très cher. On le réutilise dans une autre fournée à purifier.

Ig. — Eh bien, cela me fait penser que nous avons, hier, fait subir à Gora la fusion de zones...

Cur. — Qui est Gora et qu'est-ce que la bêtise que vous allez me conter là?



Ig. — Gora est notre chatte (nous l'appelons ainsi car elle est à moitié angora). Généralement très propre, elle a dû avoir quelques mauvaises fréquentations, qui lui ont valu d'attraper des puces. En lui passant plusieurs fois un peigne de la tête à la queue, nous l'avons débarrassée de ses impuretés... Mais comment est constitué le peigne pour le germanium? Je veux dire de quelle manière parvient-on à n'en fondre qu'une zone étroite?

Chauffage électronique.

Cur. — En utilisant le chauffage par induction à haute fréquence. Un bobinage de quelques spires entoure la zone de fusion. Il est parcouru par un intense courant de haute fréquence qui induit dans la masse du germanium des courants qui déterminent un échauffement suffisant pour le faire fondre.

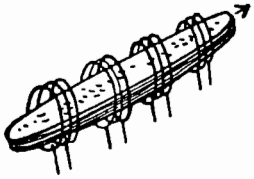
Ig. — Mais c'est exactement ce que l'on fait à l'oncle Jules!

Cur. — Que vient faire ici votre oncle? A-t-il eu, lui aussi, des puces?

Ig. — Non, mais un épanchement de synovie au genou, consécutif à une malencontreuse chute. Aussi lui fait-on de la diathermie à haute fréquence.

Cur. — Oui, je vois. On place son genou entre deux électrodes bien isolées auxquelles on applique des tensions de haute fréquence. Le champ *électrique* ainsi créé développe de la chaleur par pertes dans le diélectrique à l'intérieur même de l'organe malade. Mais dans le chauffage par induction utilisé pour la fusion de zone, c'est le champ

magnétique engendré par les courants qui induit les courants dans la masse du semiconducteur. Ce qui est remarquable dans l'action du chauffage H.F., qu'il s'agisse des champs électriques (utilisés pour les isolants) ou des champs magnétiques (servant à chauffer les conducteurs), c'est que la chaleur est développée *dans toute la masse du corps* et non



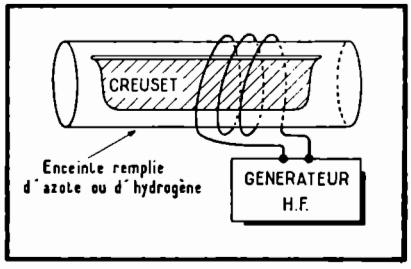


Fig. 34. — On réalise la fusion de zone en chauffant le germanium contenu dans le creuset à l'aide de courants H.F. parcourant la bobine qui se déplace lentement d'une extrémité à l'autre du creuset.

pas en pénétrant par conduction thermique, de la surface vers l'intérieur, comme c'est tout indiqué pour faire une bonne grillade...

IG. — En somme, pour en revenir à notre germanium, la bobine passe lentement d'une extrémité du creuset à l'autre...

CUR. — ... à moins que ce ne soit le creuset qui passe lentement dans l'axe d'une bobine fixe, ce qui revient au même. En réalité, on dispose plusieurs bobines espacées, de manière à obtenir en un seul passage plusieurs zones de fusion alternant avec des zones de solidification. C'est comme si l'on avait fait passer plusieurs fois une seule zone de fusion le long du creuset. J'ajoute que le mouvement est très lent : un millimètre par minute.

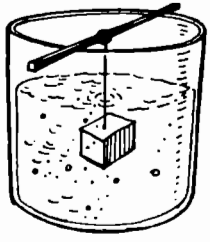
IG. — Et que fait-on pour le silicium?

CUR. — La même chose, mais à une température plus élevée, car, si le germanium fond à 940 °C, le silicium, lui, exige 1 420 °C.

Après purification, cristallisation.

IG. — Et pourquoi ne peut-on pas utiliser directement le semiconducteur ainsi purifié pour la fabrication des transistors? N'est-il pas cristallisé?

CUR. — Il l'est. Mais pas comme nous souhaitons. Il s'agit d'un assemblage de cristaux disposés en désordre. Or, il nous faut un réseau cristallin parfaitement régulier et dont on connaisse l'orientation. Nous l'obtenons en faisant croître, autour d'un petit cristal appelé « germe », un réseau cristallin unique que l'on appelle *monocristal*.



IG. — Je m'amusais à faire ainsi de beaux cristaux en mettant dans un verre du sel de cuisine dissout dans de l'eau et en y laissant tremper un fil au bout duquel je collais un minuscule cristal de sel. En une huitaine de jours, un beau cube transparent se formait autour. Est-ce ainsi que l'on procède pour les semiconducteurs?

CUR. — Le principe est le même. Mais, au lieu d'une solution, on utilise la matière en état de fusion. On y plonge le germe fixé à l'extrémité inférieure d'une tige. Celle-ci tourne autour de son axe et, en même temps, monte très lentement. Ainsi, autour du germe, des

atomes de germanium (ou de silicium) viennent s'ordonner selon la structure du réseau cristallin. La matière se solidifie en entourant le germe. Et l'on obtient, en fin de compte, en quelques heures, une barre de plusieurs centimètres de diamètre, longue de 20 à 30 cm et pesant quelques kilogrammes. On en fera des milliers de transistors.

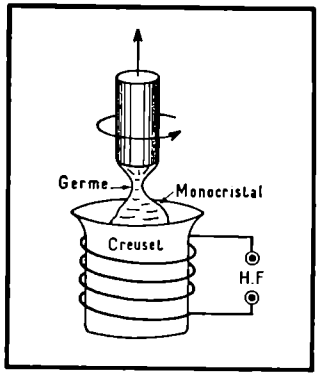
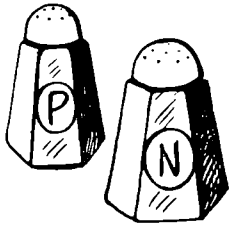


Fig. 35. — Tirage du monocristal. La masse du semiconducteur contenue dans le creuset est portée à la fusion par le chauffage H.F. à induction.



Ig. — En somme, ce monocristal est un semiconducteur de grande pureté?

Cur. — Non. J'avais omis de vous dire que, dans la masse en fusion servant au tirage du monocristal, on ajoute des impuretés du type P ou N, selon que la base doit être de l'un ou de l'autre de ces types. Car c'est la base qui, généralement, dans les phases ultérieures de fabrication, conserve le caractère du monocristal.

Et maintenant un peu de mécanique.

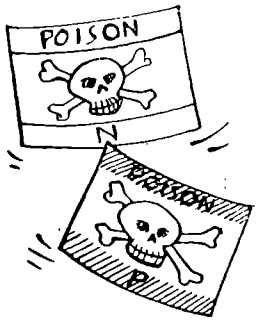
Ig. — Vous me disiez que d'un seul monocristal on obtenait des milliers de transistors. Dois-je supposer qu'on le morcelle en petites parcelles?

Cur. — Bien entendu. Pour commencer, à la manière d'un vulgaire saucisson, il est débité en tranches ou minces lamelles mesurant de 0,1 à 2 mm d'épaisseur. Ce sont des scies circulaires à pointes de diamant qui font ce travail de précision. On utilise aussi des « scies à ruban » constituées par des fils de tungstène pourvus d'un revêtement abrasif. Puis, chaque lamelle est, à son tour, découpée en petits carrés ayant chacun quelques millimètres de côté. Une telle plaquette mesurant 2 × 2 mm et 0,5 mm d'épaisseur ne pèse qu'un centième de gramme C'est vous dire qu'un monocristal de 5 kg permettrait théoriquement d'en faire un demi-million! En réalité, il y a pas mal de pertes à l'usinage, et le déchet réduit la quantité des pièces finalement obtenues

Méthode de poisons alternés.

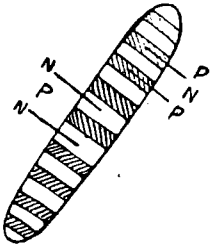
Ig. — Ce n'est quand même pas mal, même si l'on en perd la moitié.. Mais comment sur ces bases parvient-on à bâtir des transistors complets?

Cur. — En « empoisonnant » leurs deux faces avec des impuretés du type contraire de celui de la plaquette. Par exemple, si celle-ci est du type N, on introduit des impuretés du type P des deux côtés, de manière à former un émetteur et un collecteur d'un transistor P-N-P



Ig. — J'ai une idée, Curiosus. Pourquoi ne pas fabriquer des transistors « tout cuits » au cours du tirage même du monocristal. On pourrait, par exemple, au début du tirage, jeter, dans la masse fondue du semiconducteur, des impuretés du type P, ne serait-ce que de l'indium. Puis, une zone P étant ainsi formée et émergée de la masse, on y jetterait des impuretés N, par exemple de l'arsenic. Et l'on obtiendrait une zone N. Là-dessus, on ajouterait assez d'indium pour que les accepteurs deviennent porteurs majoritaires, ce qui nous donnerait une nouvelle zone P et ainsi de suite. En fin de compte, nous obtiendrions une tige de germanium où les zones P et N alterneraient. Il suffirait de couper cette tige en tranches au milieu des zones P pour avoir des transistors P-N-P ou au milieu des zones N si l'on veut avoir des N-P-N. Avouez, Curiosus, que j'ai parfois des idées de génie!

Cur. — Ce que j'admire surtout en vous, c'est la modestie... Hélas, ami, votre idée n'a rien d'inédit. On appelle cela fabrication des *jonctions tirées*. La méthode n'est pas économique, car on obtient ainsi des zones assez épaisses. De surcroît, à force d'ajouter chaque fois des impuretés,



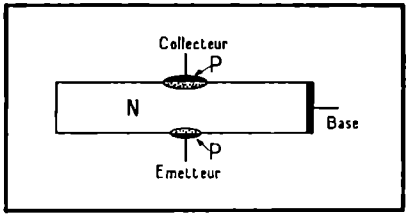
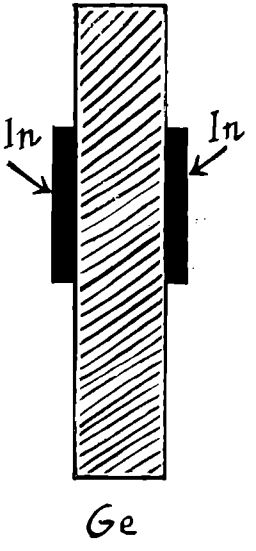


Fig. 36. — Vue en coupe d'un transistor P-N-P formé par alliage (ou fusion).

tantôt d'une espèce, tantôt de l'autre, on est conduit à en accroître sans cesse la teneur dans les zones ainsi successivement formées, ce qui ne va pas sans inconvénients. Néanmoins, la méthode des jonctions tirées est encore employée de nos jours, surtout pour le silicium.

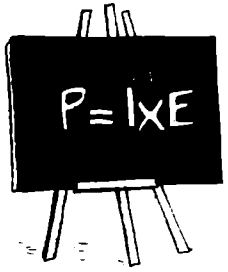
Ig. — Une fois de plus, je constate que je suis né trop tard... Revenons donc à nos petites pastilles et expliquez-moi comment on y forme l'émetteur et le collecteur.



Transistors par alliage.

Cur. — Divers procédés sont employés à cette fin, selon le modèle de transistor que l'on cherche à obtenir. Il s'agit surtout de « doper » ou « empoisonner » le matériel de la base avec des impuretés de l'autre type. Le procédé le plus simple et le plus fréquemment employé consiste à déposer, sur les deux faces d'une base de type N, des pastilles d'indium et de les chauffer rapidement à quelque 600 °C. L'indium fond à cette température, et ses atomes s'introduisent dans le germanium qui, ne fondant qu'à 940 °C, n'en est pas moins, grâce à l'agitation thermique accrue, davantage pénétrable pour les atomes d'impuretés. On obtient ainsi un transistor P-N-P. Vous remarquerez que la pastille formant

le collecteur est plus grande que celle de l'émetteur, puisque, nous en avons déjà parlé, c'est dans le collecteur que l'on dissipe la plus grande puissance. Quand l'opération est menée en dosant convenablement la température et le temps de l'échauffement, on parvient à faire pénétrer les impuretés de manière à réduire l'épaisseur restante de la base à un vingtième de millimètre. Les transistors obtenus ainsi *par alliage* (ou *par fusion*) conviennent à la plupart des usages, sauf pour des fréquences élevées.



IG. — Une fois de plus, vous me parlez de ces deux difficultés que constituent, dans le domaine des semiconducteur, les valeurs élevées de puissance et de fréquence. J'aimerais bien avoir quelques éclaircissements à ce sujet.

Un procédé vaporeux et diffus.

CUR. — Commençons donc par la question de puissance. Qui dit watts, dit calories. Pour fournir des puissances suffisantes sous ces faibles tensions que l'on emploie avec les semiconducteurs, il faut avoir des courants d'intensités élevées.

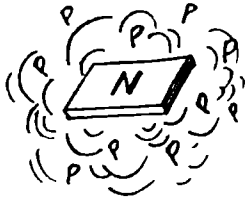
IG. — Evidemment; puisque *Puissance* = *Tension* × *Intensité*.

CUR. — Bravo! Mais ces courants, en passant dans les jonctions assez résistantes y dissipent de la chaleur. Et vous savez combien les semiconducteurs supportent mal une élévation de température.

IG. — Quel remède préconisez-vous donc?

CUR. — Tout d'abord, agrandir la section du semiconducteur, donc avoir des transistors de surface relativement grande pour réduire leur résistance. Ensuite, faciliter l'évacuation de la chaleur en montant le collecteur sur une grande plaque métallique qui sert de radiateur de chaleur. Le cuivre, qui est un excellent conducteur thermique, est tout indiqué pour cet usage.

IG. — En sorte que l'emploi rationnel des transistors nécessite l'application des règles de la thermodynamique. Si je comprends bien, il faudra encore que je me mette à l'étude dans cette science, pauvre de moi!



CUR. — Rassurez-vous, Ignotus, on peut appliquer au calcul de la propagation de la chaleur les règles qui régissent les courants dans les circuits électriques; et l'on obtient des résultats tout à fait probants... Mais pour en revenir aux transistors de puissance, je vous signale qu'ils sont souvent réalisés par le procédé de *diffusion*. On porte les pastilles de semiconducteurs à une température proche de son point de fusion en les plaçant dans une atmosphère de gaz contenant des vapeurs d'impuretés destinées à former l'émetteur et le collecteur. Les atomes d'impuretés pénètrent progressivement dans le semiconducteur. L'opération dure plusieurs heures. C'est dire qu'en dosant la teneur en impuretés du gaz et en réglant la durée de la diffusion, on parvient à déterminer avec précision la profondeur de la pénétration des atomes étrangers, donc l'épaisseur de la base. De plus, ce procédé se prête fort bien à l'obtention des grandes surfaces d'émetteur et de collecteur pour les transistors de puissance.

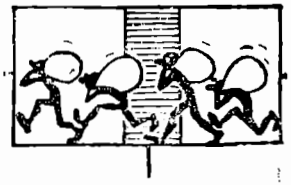
IG. — Tant mieux. Mais alors, qu'est-ce qui s'oppose au fonctionnement des transistors aux fréquences élevées?

Les deux obstacles.

CUR. — Deux facteurs : le temps de transfert et la capacité.

IG. — De quel transfert s'agit-il?

CUR. — Du passage des porteurs des charges, à travers la base, de l'émetteur vers le collecteur. Ce temps n'est pas négligeable, puisque, je vous l'avais dit, électrons et lacunes sont animés de vitesses assez limitées. Prenons le cas des électrons parcourant 40 mètres par seconde. Admettons qu'on parvienne à réduire l'épaisseur de la base à $1/10^e$ de millimètre. Pour la traverser, un électron aura besoin de 2,5 microsecondes.



IG. — Ce n'est pas grand-chose.

CUR. — N'empêche que pour un signal de 1 mégahertz (n'oubliez pas que 1 MHz = 1 000 000 Hz) c'est beaucoup trop, car chaque période n'y dure qu'une seule microseconde et que, pendant que notre lourdaud d'électron chemine paisiblement à travers la base, il aurait dû, à plus

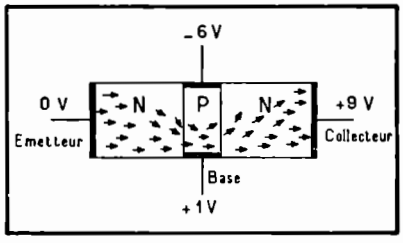
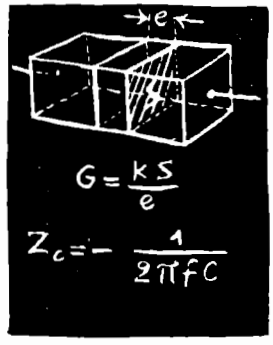


Fig. 37. — Principe du transistor-tétrode. L'armature portée à — 6 V, et placée en face de la connexion de la base, repousse les électrons, en réduisant la section effective de la base.



de deux reprises, changer d'allure. Voilà donc un transistor incapable d'amplifier les courants de fréquences dépassant quelques centaines de kilohertz.

IG. — Quelle tragique situation! Je n'en vois qu'une issue : réduire l'épaisseur de la base. Est-ce possible?

CUR. — Oui, et je vous en indiquerai les moyens. Mais alors nous accentuerons l'autre facteur dangereux : la capacité entre l'émetteur et collecteur. Car vous les rapprochez en rendant la base plus mince.

IG. — Et en quoi cette capacité nous gêne-t-elle?

CUR. — Ne vous souvient-il donc pas de tous les méfaits que les capacités parasites commettent dans les montages à tubes? Ici elles présentent les mêmes inconvénients. La capacitance (ou réactance capacitive) qu'elles opposent au passage des courants est d'autant plus faible que la fréquence des courants est plus élevée. En sorte que les courants de haute fréquence fuient par les capacités parasites au lieu de suivre les chemins qui leurs sont assignés.

IG. — En effet, ces capacités sont comme des trous dans un récipient. Celui-ci est capable de contenir de grosses noix. Mais si l'on y met des petits pois, ils passeront à travers... Que faire alors pour sortir du terrible dilemme? D'une part on réduit l'épaisseur de la base pour diminuer le temps de transfert, ce qui accroît la capacité émetteur-collecteur. Et, d'autre part, il faut que cette capacité soit aussi faible que possible.

Une tétrode qui n'en est pas une.

CUR. — Je vous laisse le soin de trouver vous-même la solution. Voyons, Ignotus, de quoi dépend la capacité en dehors de la distance entre les armatures d'un condensateur?

IG. — J'y suis! Oui, il faut réduire la surface de ces armatures. Donc, pour que nos transistors fonctionnent aux fréquences élevées, il faut que les surfaces de l'émetteur et du collecteur soient très petites.

CUR. — C'est bien cela. Notez en passant qu'il y a un moyen indirect de réduire la capacité efficace, sans pour autant diminuer à l'excès la surface des jonctions (ce qui limiterait par trop la puissance dissipée). C'est réalisé dans le *transistor-tétrode*. Je m'empresse de vous dire que son fonctionnement n'offre aucune analogie avec celui de la

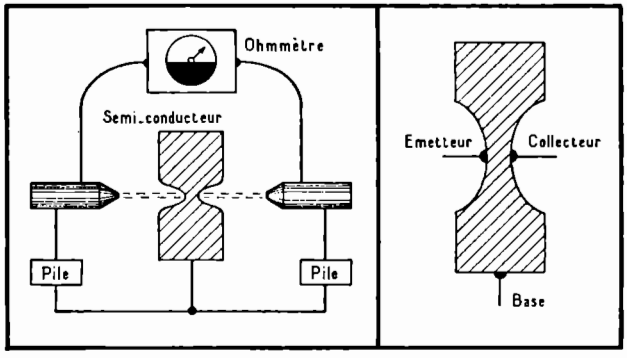


Fig. 38. — Procédé de fabrication du transistor à barrière de surface et vue en coupe d'un tel transistor.

tétrode à vide... Ici, la quatrième électrode est placée sur la base du côté opposé à la connexion de base normale, et son potentiel est du signe contraire à celui de la connexion de base. Dans ces conditions, seule la portion de la base voisine de sa connexion normale est à un potentiel capable de favoriser la circulation des porteurs de charges. Ainsi, la section effective du transistor se trouve-t-elle considérablement réduite.

Amincissement de la base.

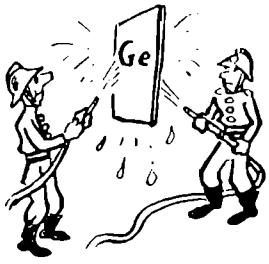
IG. — Pas bête du tout, cette façon d'étrangler le flux des électrons ou des trous! Mais de quelle manière parvient-on, dans les transistors « classiques », à réduire l'épaisseur de la base?

CUR. — On le fait en creusant, de chaque côté de la base, une sorte de cratère. Les pointes des deux cratères arrivent alors à une distance de l'ordre de 0,002 mm. On dépose dès lors dans les deux creux un peu d'indium, et le tour est joué.

IG. — A vous entendre, c'est très simple. Mais je me doute de la précision des outils qui doivent être employés.

CUR. — Ces outils, Ignotus, ce sont des jets de liquide très fins qui conduisent du courant continu à travers le germanium. Et c'est

le phénomène d'électrolyse qui, atome par atome, enlève la matière du semiconducteur. A la fin de l'opération, le sens du courant est inversé, et l'électrolyte dépose ses atomes d'indium dans les cratères qui viennent d'être creusés.



IG. — Formidable! Mais comment sait-on le moment précis où la base est suffisamment mince?

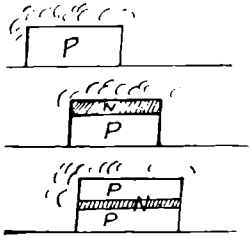
CUR. — En mesurant la résistance électrique entre les deux jets de liquide. Les transistors ainsi fabriqués peuvent être utilisés à des fréquences atteignant 100 MHz. On les appelle transistors à *couche de barrage.*

IG. — En tout cas, ils ne font pas de barrage aux fréquences élevées!

CUR. — Un autre moyen de réduire l'épaisseur de la base est la méthode de *double diffusion.* Pour faire un transistor du type P-N-P, on prend une plaquette de semiconducteur du type P...

IG. — Vous vous trompez, Curiosus.

CUR. — Pas du tout. Vous allez voir comment les choses se passent. On ne soumet aux actions des vapeurs qu'une seule face de la plaquette. Et les vapeurs contiennent des impuretés des deux types à la fois, mais avec des donneurs ayant une vitesse de pénétration légèrement supérieure à celle des accepteurs, ces derniers étant en revanche plus nombreux. Il en résultera la formation d'une mince couche N en avant d'une couche P. Nous obtenons donc un transistor P-N-P, dont la base n'a qu'un millième de millimètre d'épaisseur, ce qui permet de l'utiliser à des fréquences atteignant 400 MHz.



IG. — C'est vraiment ingénieux.

CUR. — Ce qui ne l'est pas moins, c'est le transistor « drift », du type N-P-N, qui, dans la couche de la base la plus proche de l'émetteur, comporte un plus grand taux d'impuretés (accepteurs, en l'occurrence),

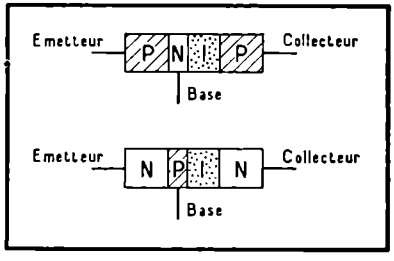


Fig. 39. — Deux types possibles de transistors comportant une zone intrinsèque entre base et collecteur : P-N-I-P et N-P-I-N.

de manière à en augmenter la conduction. De la sorte, les électrons pénétrant dans la base sont considérablement accélérés, ce qui permet de reculer à 1 000 MHz la limite des fréquences.

IG. — De mieux en mieux! Mais dans cet ordre d'idées, ne pourrait-on pas, pour réduire la capacité émetteur-collecteur, éloigner ces deux électrodes l'une de l'autre sans, pour autant, accroître l'épaisseur de la base?

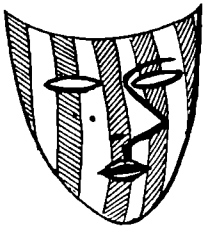
Eloignement de la base.

CUR. — Et quel moyen préconisez-vous à cette fin?

IG. — Je verrais volontiers interposée, entre base et collecteur, une couche de germanium neutre, ni P, ni N, mais servant à assurer la conduction et l'écartement à la fois.

CUR. — Mais ce n'est pas bête du tout, mon ami. Et cela existe sous le nom de transistor P-N-I-P, où la lettre I désigne la couche de germanium intrinsèque.

IG. — Nom d'un trou! Une fois de plus, on m'a devancé!



Où il sera question de montagnes.

CUR. — Désolé, Ignotus... Et, pour terminer, je vous signale encore un modèle de transistor pour hautes fréquences obtenu par double diffusion. On prend du semiconducteur type P qui servira de collecteur et on y diffuse une mince couche d'impuretés N qui va constituer la base. Puis, toujours du même côté, on fait pénétrer par diffusion des impuretés du type P qui, tout en réduisant encore l'épaisseur de la base à quelque 0,002 mm, formeront l'émetteur. L'astuce consiste à effectuer cette dernière diffusion à travers un masque, de manière à n'agir que le long d'étroites bandes à la surface de la lame. Celle-ci présente donc alternativement des bandes du type P (émetteur) et N (base). On dépose alors sur cette surface des gouttes de cire couvrant à la fois une partie P et une partie N. Le diamètre de la goutte ne dépasse pas un quart de millimètre. Et on plonge la lame dans une solution qui attaque les parties de la surface non protégées par la cire. La gravure chimique ainsi effectuée laisse donc intactes les petites surfaces protégées tout en réduisant l'épaisseur des autres. Et la lame se trouve couverte de minuscules monticules dont chacun, une fois débarrassé de la cire, offre la possibilité d'établir les connexions de base et d'émetteur. Celles-ci sont réalisées en fil d'or de 0,025 mm de diamètre.

IG. — Comment peut-on manier des fils aussi fins?

CUR. — Sous un microscope binoculaire. Mais auparavant, bien entendu, la lame gravée est découpée en autant de morceaux qu'il y a de monticules, chacun formant un transistor. On les appelle « mesa », du nom qui, en Amérique du Sud, est donné aux plateaux montagneux caractérisés par leurs parois abruptes. Et ces mesa dépassent vaillamment en fréquence les 100 MHz, c'est-à-dire descendent au-dessous de 3 mètres en longueurs d'onde.

IG — Que de soins, que de minutie exige la fabrication de ces microscopiques montagnes!

Les phases finales de la fabrication.

CUR. — Et ne croyez pas, Ignotus, que le travail est achevé lorsqu'on a formé l'émetteur, la base et le collecteur, que ce soit par alliage, par électrolyse ou par diffusion. Notez, en passant, que ces trois procédés font respectivement appel à des agents solides, liquides ou gazeux.

IG. — Que reste-t-il encore à faire pour que le transistor soit fin prêt à aborder les vicissitudes de l'existence?

CUR. — Traiter sa surface par un lavage dans l'acide et lui assurer sa remarquable longévité en le montant avec toute la rigidité voulue pour résister aux chocs et aux vibrations. Puis l'enfermer dans un boîtier étanche et opaque, afin de le protéger de l'humidité, ennemie mortelle des semiconducteurs, et de la lumière.

IG. — Pourquoi donc?

CUR. — Parce que, je vous l'avais déjà dit, les rayons lumineux peuvent modifier la conductibilité des semiconducteurs ou déclencher une émission électronique. Ces phénomènes sont mis à profit dans les photo-diodes et les photo-transistors. Mais un transistor normal doit

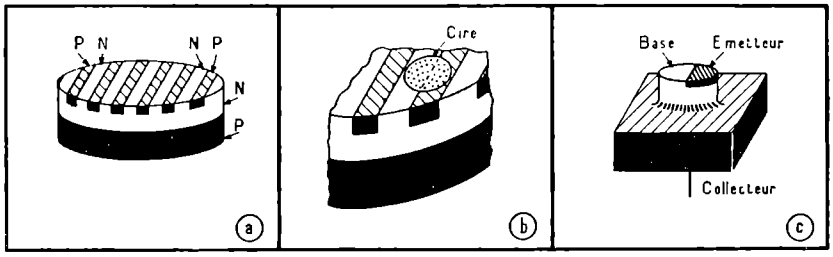


Fig. 40. — Phases consécutives de la fabrication d'un transistor mesa.

être mis à l'abri de la lumière. Il est donc enfermé soit dans une capsule de matière plastique, soit dans un boîtier métallique où l'on a pratiqué le vide ou introduit un gaz neutre tel que l'azote. L'établissement des connexions pose souvent des problèmes ardus, car il faut assurer des contacts purement ohmiques entre les trois zones du transistor et les fils correspondants, en évitant à tout prix la formation de jonctions parasites.

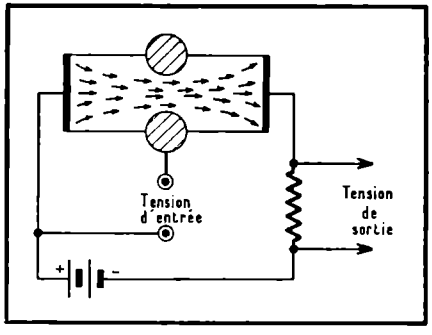


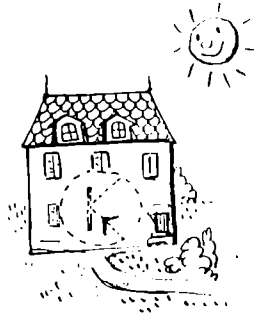
Fig. 41. — Transistor à effet de champ.

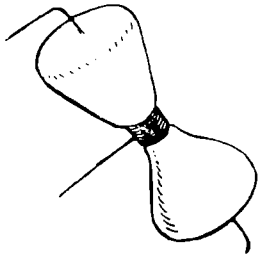
IG. — Je vois, en résumé, que pour fabriquer des transistors, il faut connaître à la fois la physique, la chimie et la mécanique. C'est beaucoup trop. J'aime autant les acheter. A moins que...

Travaux de champs.

CUR. — Quelle idée saugrenue allez-vous m'exposer?

IG. — Je crois qu'il y aurait un moyen de fabriquer un transistor sans base, ni émetteur, ni collecteur. Pourquoi ne pas prendre un





simple bâtonnet de germanium ou de silicium et l'entourer, au milieu, d'un anneau auquel on appliquerait les tensions à amplifier. Le champ électrique ainsi créé étranglerait plus ou moins le flux des porteurs de charges circulant d'une extrémité à l'autre du bâtonnet. Et le courant y serait modulé exactement comme il l'est dans une triode à vide sous l'action du potentiel de la grille.

CUR. — Mon pauvre Ignotus!...

IG. — Qu'est-ce qui ne va pas dans mon raisonnement?

CUR. — Tout va tellement bien que le dispositif que vous venez d'inventer existe depuis longtemps. On l'appelle transistor à *effet de champ* ou « fieldistor ». On peut en rapprocher également le *tecnetron* inventé par l'ingénieur français S. Teszner et qui réunit tous les avantages des transistors et des tubes à vide. Mais je me demande dans quelle mesure ces dispositifs particuliers peuvent encore être considérés comme faisant partie de la grande famille des transistors...

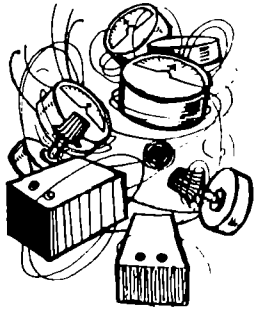
Pour utiliser les triodes à cristal, il faut en connaître les caractéristiques essentielles. Celles-ci peuvent être exprimées, comme pour les tubes, aussi bien par des valeurs numériques des paramètres fondamentaux que par des courbes montrant comment certaines grandeurs varient en fonction d'autres. Or, dans le cas des transistors, la représentation graphique est particulièrement précieuse, compte tenu de l'influence que chaque variable exerce sur la plupart des autres.

Voilà pourquoi nos deux amis feront de la besogne bien utile en examinant les diverses caractéristiques numériques et graphiques des transistors.

★ **SOMMAIRE : Montage pour le relevé des caractéristiques. - Courbes $I_b = f(E_b)$ et $I_c = f(E_b)$. - Pente. - Amplification de courant. - fication de courant. - Saturation. - Familles de courbes. - Analogie avec Résistance d'entrée. - Relation entre pente, résistance interne et amplila penthode. - Puissance limite. - Résistance de sortie. - Détermination des paramètres à partir des réseaux de courbes.**

LE RÈGNE DES COURBES

Une initiative d'Ignotus.



CURIOSUS. — Saperlipopette! Que vois-je? Qu'est-ce que cette invraisemblable accumulation d'instruments de mesure, de piles et de potentiomètres sur votre table?

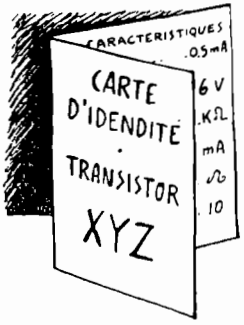
IGNOTUS. — Evidemment, vous ne voyez pas le principal. Et pour cause. Car à côté de mes voltmètres et milliampèremètres, le transistor paraît bien petit. Et c'est pourtant lui le héros de la fête.

CUR. — Mais quel est le but de tout ce déploiement d'appareils?

IG. — Vous souvenez-vous comment, naguère, nous relevions ensemble les courbes caractéristiques des tubes électroniques : les variations du courant anodique en fonction soit de la tension de grille, soit de la tension de plaque? Eh bien, je voudrais faire des relevés analogues pour mon transistor.

CUR. — Louable tentative. Et y parvenez-vous?

IG. — Oui et non... Ce n'est pas une réponse de Normand. Mais ce qui me trouble, c'est qu'avec les tubes, nous n'avions à prendre en considération que trois grandeurs, alors qu'avec le transistor il en faut considérer quatre :



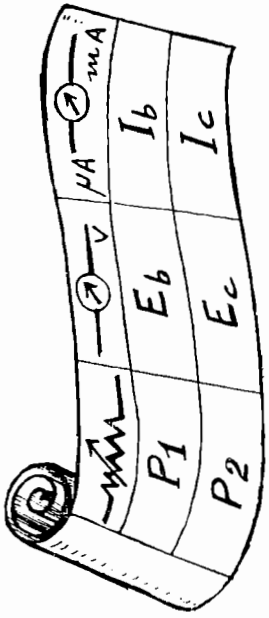
TUBE ELECTRONIQUE	TRANSISTOR
Intensité du courant anodique I_a.	Intensité du courant de collecteur I_c.
Tension anode-cathode E_a.	Tension collecteur-émetteur E_c.
Tension grille-cathode E_g.	Tension base-émetteur E_b.
	Intensité du courant de base I_b.

CUR. — C'est tout à fait exact. En effet, sauf cas exceptionnels, les tubes fonctionnent sans courant de grille. En revanche, le courant de base, lui, joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du transistor.

Un montage rationnel.

IG. — Voici donc le schéma du montage que j'ai imaginé pour relever ces quatre grandeurs.

CUR. — Je distingue ici le potentiomètre P_1 qui permet de varier à volonté la tension entre base et émetteur, tension mesurée par le voltmètre E_b. Vous avez, d'autre part, un potentiomètre P_2 servant à varier la tension collecteur-émetteur mesurée par le voltmètre E_c. Et vous relevez le courant de base à l'aide du microampèremètre I_b, alors



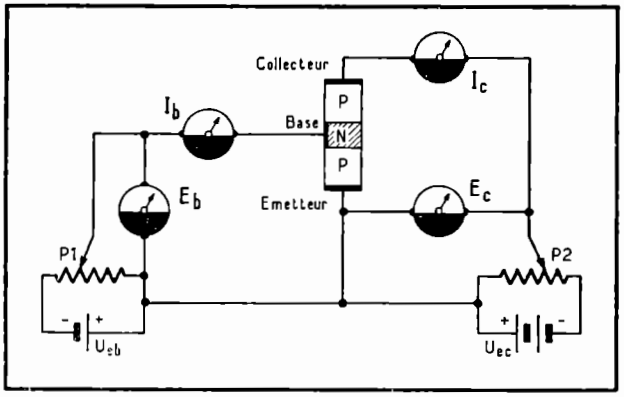


Fig. 42. — Montage servant au relevé des caractéristiques du transistor.

que l'intensité du courant de collecteur est mesurée à l'aide du milliampèremètre I_c. Félicitations, Ignotus : avec votre montage, on peut faire du bon travail! Qu'est-ce donc qui vous ennuie?

IG. — J'ai l'impression d'être victime de la farce que j'ai jouée, étant gosse, à notre brave cuisinière Mélanie.

CUR. — Que vient faire ce martyr de votre cruauté précoce dans le domaine des semiconducteurs?

IG. — Un soir, j'avais réuni toutes les casseroles entre elles par un mince fil, en sorte que, lorsque Mélanie voulut en prendre une, toute la batterie de cuisine lui dégringola sur la tête.

CUR. — Cela fait honneur à votre imagination... sinon à votre bon goût. Mais je ne vois toujours pas...

IG. — C'est pourtant évident. J'ai l'impression que les aiguilles de mes instruments sont reliées par des fils invisibles comme les casseroles de Mélanie. Il suffit que l'une d'elles bouge pour que deux autres se

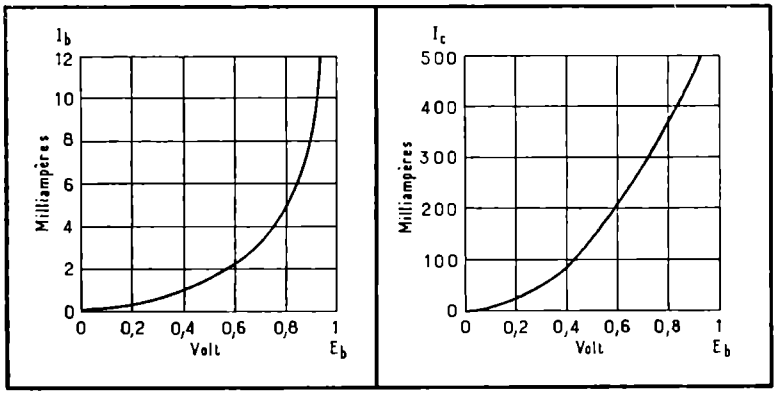
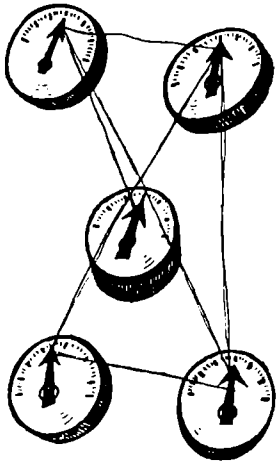


Fig. 43. — Courant de base I_b en fonction de la tension base-émetteur E_b. Dans cette figure, comme dans toutes celles qui représentent les courbes caractéristiques, la polarité des tensions de base et de collecteur n'est pas précisée. Elle est positive pour les transistors N-P-N et négative pour les P-N-P.

Fig. 44. — Variation du courant I_c en fonction de la tension base-émetteur E_b.

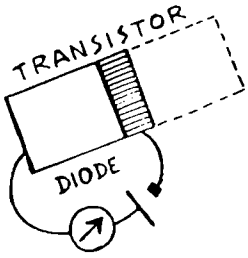


mettent aussitôt en mouvement. Par exemple, quand je tourne le potentiomètre P_1 en changeant ainsi la tension E_b de la base, le courant I_b de base change lui aussi, en même temps que le courant I_c de collecteur.

Deux premières courbes.

CUR. — N'est-ce pas absolument normal? C'est le principe même de fonctionnement du transistor que vous mettez ainsi en évidence. En appliquant entre base et émetteur une tension croissante, vous augmentez l'intensité du courant allant de l'émetteur vers la base et de ce fait, intensifiez le courant allant de l'émetteur, à travers la base, vers le collecteur.

IG. — Bien entendu. C'est tout à fait analogue à l'influence de la grille sur le courant anodique dans les tubes à vide. D'ailleurs, voici les deux courbes que j'ai relevées en réglant P_1 et en notant pour chaque valeur de la tension E_b, d'une part l'intensité I_b, d'autre part l'intensité I_c.



CUR. — C'est très bien, Ignotus. Je vois qu'il s'agit d'un transistor de moyenne puissance, puisque le courant de collecteur atteint ici la respectable valeur d'un demi-ampère... Votre première courbe, où les choses se passent uniquement entre émetteur et base et où l'on voit le courant de base varier en fonction de son potentiel par rapport à l'émetteur, c'est tout bonnement la caractéristique de la diode formée par l'émetteur et la base.

IG. — C'est vrai! En somme, le courant s'y amorce lentement, puis croît de plus en plus rapidement. Je vois que cette courbe n'offre pas grand intérêt. En revanche, celle où l'on voit le courant de collecteur varier sous l'action de la tension de base me paraît de la plus haute importance.

Ignotus s'engage sur une pente fatale.

CUR. — Ne nous emballons pas, ami. Cette deuxième courbe est effectivement fort instructive. Elle montre notamment que la *pente* du transistor, loin d'être constante, varie selon les valeurs de la tension de base.

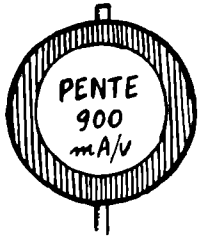
IG. — Comment? Dans les transistors on parle également de pente? Pour les lampes, c'est le rapport d'une faible variation du courant anodique à la faible variation du courant de grille qui l'a causée.

CUR. — Eh bien, ici, par analogie, nous allons définir la pente comme le rapport d'une faible variation ΔI_c à la faible variation ΔE_b de la tension de base qui l'a déterminée. Si l'on désigne la pente par S, cela donne :

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta E_b}$$

et cela s'exprime, comme pour les tubes, en milliampères par volt.

IG. — Je constate, en effet, que la pente de notre transistor augmente quand la tension de base croît. Entre 0,2 et 0,4 V, le courant n'augmente que de 50 mA, alors qu'en passant de 0,6 à 0,8 V la tension de base le fait croître de 180 mA environ. La pente est donc, dans le premier cas, de 50 : (0,4 — 0,2) = 250 mA/V et, dans le second, de 180 : (1 — 0,8) = 900 mA/V. C'est formidable! Jamais un tube ne permet d'atteindre de telles valeurs de pente.



CUR. — N'en déduisez cependant pas trop vite que l'amplification du transistor est, elle aussi, formidable. Le rôle de la pente est ici assez effacé, car ce qui compte, en définitive, c'est l'influence du courant de base sur le courant de collecteur.

Danger! Puissance limitée.

IG. — Je l'ai mise en évidence en relevant les valeurs du courant de collecteur I_c en fonction du courant de base I_b pour deux valeurs de la tension E_c sur le collecteur : 2 V et 10 V.

CUR. — Et pourquoi une partie de la courbe pour cette dernière tension E_c = 10 V est-elle tracée en pointillé?

IG. — Parce que je l'ai dessinée « au chiqué ». En effet, je n'ai pas osé aller au-delà d'un courant de collecteur égal à 35 mA, parce que mon transistor est limité en puissance à 350 mW (la notice du fabricant est à ce sujet fort explicite). Mes 35 mA multipliés par les 10 V donnent

bien cette puissance limite. Et je ne voudrais pas la dépasser, au risque de provoquer cette avalanche de trous et d'électrons qui caractérise un transistor « emballé »... et de voir ainsi détérioré le fruit de mes économies.

CUR. — Vous avez agi sagement, et je vous en félicite. Notez que, le plus souvent, les courbes montrant la variation de I_c sous l'action de I_b se rapprochent de la droite. Nous avons, d'ailleurs, déjà eu l'occasion d'en examiner une dans la figure 24.

IG. — En effet. Et je me souviens que ces courbes permettent de déterminer le coefficient d'amplification en courant β. Il indique combien de fois le courant de collecteur varie plus vite que celui de base.

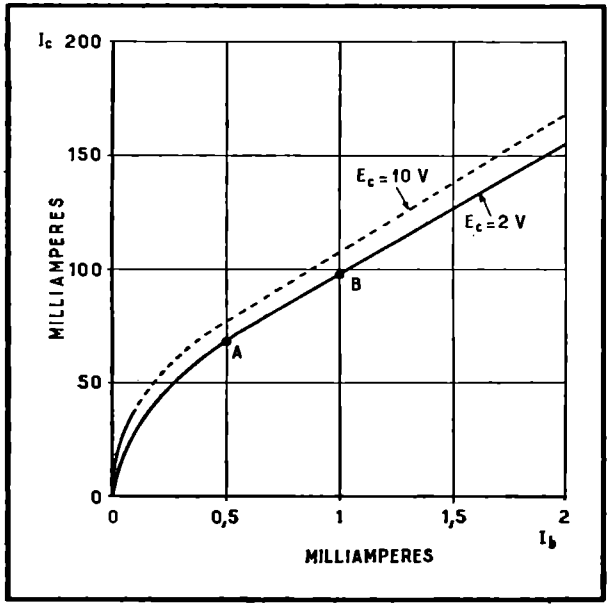


Fig. 45. — Variation du courant de collecteur I_c en fonction du courant de base I_b pour deux valeurs de la tension de collecteur E_c.

CUR. — Pourriez-vous le déduire, par exemple de la courbe $E_c = 2$ V?

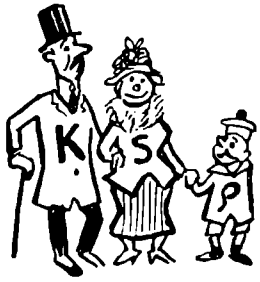
IG. — C'est bien facile. Quand nous faisons passer le courant de base, par exemple, de 0,5 à 1 mA (points A et B), le courant de collecteur passe de 70 à 97,5 mA. Donc une variation de 0,5 mA du courant de base entraîne un accroissement de 27,5 mA de courant de collecteur. L'amplification de courant est donc $\beta = 27{,}5 : 0{,}5 = 55$ fois.

CUR. — Bravo! Et d'une manière plus générale, on peut dire que

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

où ΔI_c et ΔI_b sont respectivement des faibles variations du courant de collecteur et du courant de base.

Une résistance qui manquait à l'appel.



IG. — Tiens, tiens, tiens! Cela me rappelle quelque chose, comme un air de ma lointaine jeunesse, toutes ces faibles variations des intensités et des tensions. Après la pente et le coefficient d'amplification, manque encore la résistance interne... et nous retrouverons la même famille de paramètres fondamentaux que pour les tubes.

CUR. — Doucement, ami! Méfiez-vous, une fois de plus, d'analogies hâtives. Le coefficient d'amplification des tubes est un rapport de deux tensions; pour les transistors, c'est le quotient de deux courants. De même, quand on parle de la résistance interne des tubes, c'est celle de sortie. Or, dans le domaine des transistors, nous avons déjà eu l'occasion de parler de leur *résistance d'entrée* ou résistance émetteur-base. Et, comme toute résistance, celle-ci est un rapport d'une tension à une intensité, comme dirait feu le physicien Ohm.

IG. — Ou, pour parler avec la même rigueur que vous, c'est le rapport d'une faible variation de la tension de base à la faible variation qu'elle détermine dans le courant de base. Et, en usant comme vous de ces « deltas » pour désigner les faibles variations, j'écrirai que cette résistance d'entrée

$$r_e = \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b}$$

CUR. — Ignotus, auriez-vous avalé une sole géante pour avoir le cerveau à ce point chargé de phosphore? Puisque vous en êtes là, pourriez-vous, d'une de vos courbes, tirer la valeur de la résistance d'entrée de votre transistor?

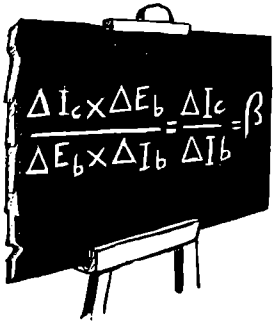
IG. — Rien de plus facile. Je retourne à la courbe de la figure 43 montrant comment I_b varie en fonction de E_b et je constate qu'en passant de 0,5 à 0,6 V, le courant varie d'environ 1 mA. J'obtiens donc r_e en divisant 0,1 par 1, ce qui me donne 0,1 ohm.

CUR. — N'avez-vous pas honte, Ignotus, de confondre, à votre âge, milliampères et ampères?

IG. — Mille excuses! En fait, je dois diviser 0,1 V par 0,001 A, ce qui me donne $r_e = 100\ \Omega$.

Une relation bien utile.

CUR. — J'aime mieux cela. Et, pour vous punir de cette horrible erreur, je vous infligerai un petit problème de calcul : multipliez donc la pente par la résistance interne en utilisant les définitions de ces grandeurs.



IG. — C'est facile :

$$S \times r_e = \frac{\Delta I_c}{\Delta E_b} \times \frac{\Delta E_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

Je me doutais bien que j'allais aboutir à quelque chose de ce genre. Ainsi donc l'*amplification de courant est égale au produit de la pente par la résistance d'entrée.* Cela me rappelle la relation établie pour les tubes : $K = S \times \varrho$, où, cependant, ϱ désigne la résistance de sortie.

CUR. — Pourriez-vous vérifier que cette égalité s'applique bien aux paramètres que vous avez calculés pour votre transistor?

IG. — Aux environs de 0,5 V, la pente, d'après la courbe de la figure 44, serait de 500 ou 600 mA/V, soit en moyenne 0,55 A/V. Si je

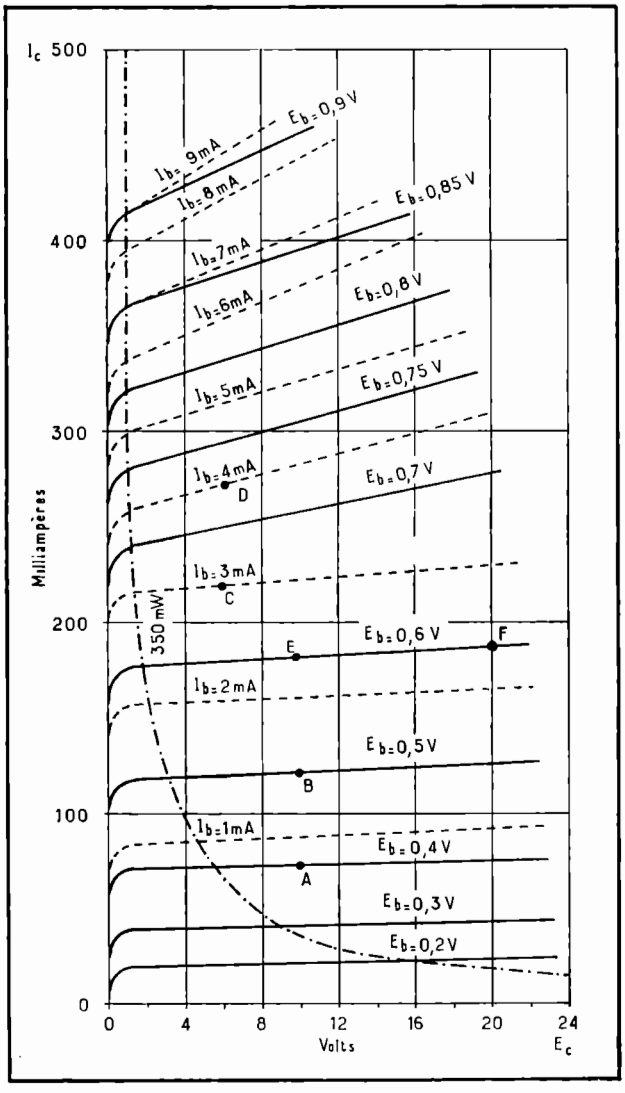
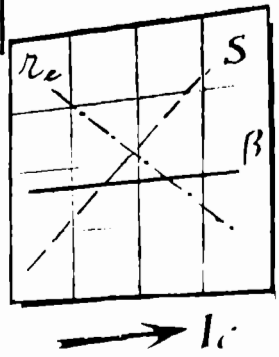


Fig. 46. — Variation du courant de collecteur I_c en fonction de la tension de collecteur E_c pour diverses valeurs de la tension E_b et du courant I_b de base. Il s'agit toujours de ce transistor de moyenne puissance qui a permis de relever les courbes des figures 43 à 45.

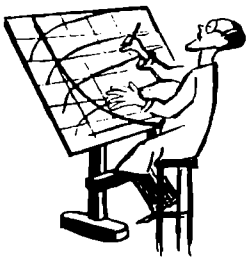
la multiplie par la résistance interne qui, au même point, est de 100 Ω, j'obtiens 55, ce qui est bien l'amplification de courant que nous avons trouvée.

Cur. — Comme quoi tout va bien dans le meilleur des mondes. Notez, en passant, Ignotus, que généralement le coefficient d'amplification ne varie guère quand le courant de collecteur augmente. Par contre, nous l'avons vu, la pente, elle, augmente avec I_c.

Ig. — D'où je tire la conclusion que, pour que notre relation $S \times r_e = \beta$ demeure valable, la résistance d'entrée doit, de son côté, diminuer quand le courant de collecteur augmente.



Toutes les courbes en un graphique.



CUR. — La vérité sort de la bouche des enfants... Il faut maintenant vous dire, cher ami, que les diverses informations que nous trouvons éparpillées dans les courbes que vous avez relevées, sont plus aisément utilisables si vous vous donnez la peine d'établir, à la suite de vos mesures, un graphique montrant comment le courant de collecteur varie quand on change la tension de ce même collecteur.

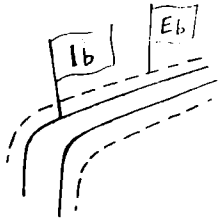
IG. — Il s'agit, si je comprends bien, de courbes analogues à celles du courant anodique en fonction de la tension anodique.

CUR. — C'est tout à fait cela.

IG. — Mais pour quelle valeur de la tension sur la base dois-je relever une telle courbe?

CUR. — Vous tracerez une série de courbes pour toute une suite de valeurs de E_b. Commencez, par exemple, par régler celle-ci sur 0,2 V. Ensuite, augmentez progressivement la tension sur le collecteur en partant de zéro et notez les intensités I_c correspondantes.

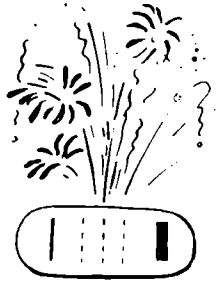
IG. — C'est très curieux. Le courant, partant de zéro, atteint la valeur de 20 mA pour moins de 2 V et, dès lors, il n'augmente guère, même si je pousse jusqu'à 24 V la tension sur le collecteur. A quoi cela est-il dû?



CUR. — Vous êtes en présence d'un phénomène de saturation. Quand tous les porteurs de charges suscités par la tension appliquée entre la base et l'émetteur participent à la formation du courant de collecteur, vous avez beau augmenter la tension de collecteur...

IG. — ... la plus belle fille du monde ne peut donner que ce qu'elle a.

CUR. — Maintenant que vous avez relevé la courbe pour $E_b = 0{,}2$ V, vous pouvez en relever d'autres pour $E_b = 0{,}3$ V et ainsi de suite. Par ailleurs, vous pouvez fixer non pas telle ou telle valeur de la tension de base, mais (ce qui revient au même) toute une suite de valeurs du courant de base I_b. Vous voyez que nous obtenons ainsi deux familles de courbes exprimant la variation du courant de collecteur en fonction de la tension de collecteur pour diverses valeurs de la tension ou du courant de base. On dit que ces dernières valeurs, qui sont fixes pour chacune des courbes, en sont les paramètres.



Ressemblances et différences.

IG. — Ces nobles familles ressemblent beaucoup à celles qui, pour les tubes à vide, montrent comment le courant anodique varie en fonction de la tension anodique avec, pour paramètres, la tension de grille. La ressemblance est particulièrement frappante dans le cas des penthodes.

CUR. — C'est exact. Cependant, vous noterez deux différences essentielles. D'une part, les courbes d'une penthode semblent jaillir d'un seul point en divergeant ensuite...

IG. — ... à la manière d'un feu d'artifice.

CUR. — Si vous voulez. Quant aux courbes des transistors, elles montent très rapidement pour, ensuite, après un coude, rester presque horizontales. Vous le constaterez mieux en examinant les courbes d'un transistor de faible puissance. D'autre part, les courbes d'une penthode sont très serrées pour des faibles valeurs de la tension de grille (je veux dire lorsque la grille est fortement polarisée). Puis, la distance entre les

courbes voisines augmente. Mais dans le cas du transistor, les courbes pour divers courants de base (en pointillé) sont sensiblement équidistantes. Et c'est tout à l'avantage de notre bonne triode à cristal.

IG. — Pourquoi donc?

CUR. — Ne voyez-vous pas qu'elle est capable d'amplifier plus fidèlement que la penthode, surtout pour des signaux de forte amplitude. La même variation du courant de base dans le sens positif et dans le sens négatif y déterminera des variations de valeurs égales du courant de

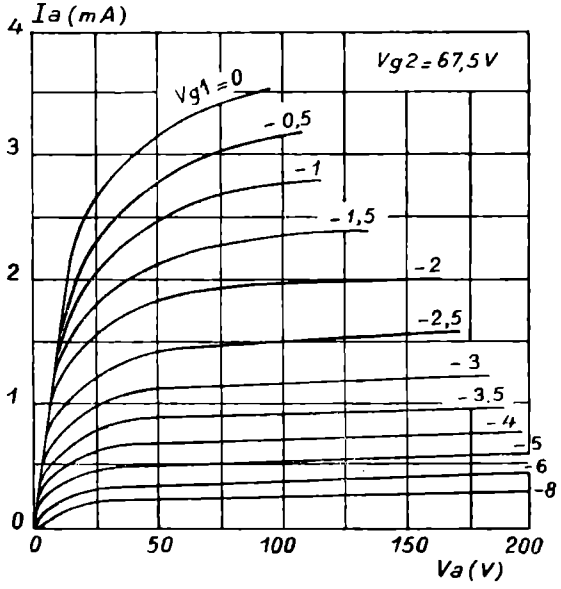


Fig. 47. — Variation du courant anodique d'une penthode en fonction de sa tension anodique pour diverses valeurs de la polarisation de grille.

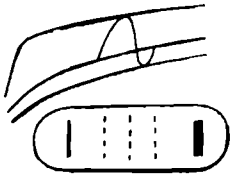
collecteur. Alors que, dans une penthode, les alternances positives et négatives de la tension de grille déterminent des variations inégales du courant anodique.

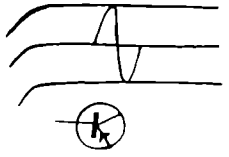
IG. — Et cela se manifeste par cette horrible déformation que l'on appelle distorsion non-linéaire. Ainsi donc, les transistors ont sur les penthodes l'avantage d'une meilleure linéarité. Vive le transistor!

Exploitation des courbes.

CUR. — Je voudrais revenir à nos familles de courbes de la figure 46 pour vous faire comprendre à quel point elles donnent une idée complète des principales propriétés du transistor. Vous pouvez en déduire sa pente en un point quelconque de la tension de base.

IG. — En effet, si je passe par exemple de 0,4 à 0,5 V (du point A au point B), le courant passe de 75 à 125 mA, soit un accroissement de 50 mA. Et la pente est 50 : 0,1 = 500 mA/V.





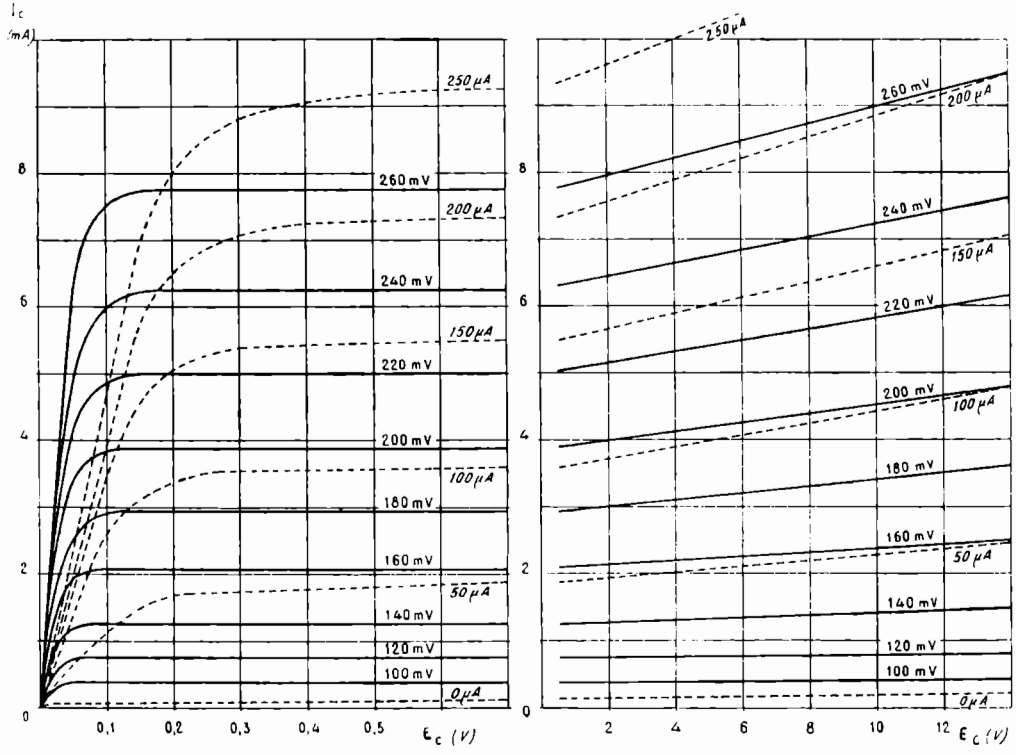


Fig. 48. — Courbes I_c/E_c d'un transistor de faible puissance. A gauche, l'échelle des tensions de collecteur E_c est dilatée de manière à montrer plus clairement ce qui se passe dans la région comprise entre 0 et 0,7 V.

CUR. — Vous pouvez, avec la même facilité, déduire de notre graphique l'amplification de courant.

IG. — Je pense qu'il faut, à cette fin, passer d'une courbe de I_b à une autre. Prenons, par exemple, les points C et D pour lesquels le courant de base diffère de 1 mA, alors que celui de collecteur passe de 220 à 275 mA, soit un accroissement de 55 mA. Et voici donc notre amplification de courant : $\beta = 55 : 1 = 55$. Pas plus compliqué que ça... Mais qu'est-ce que cette bizarre courbe qui descend de gauche pour aller à droite et que vous avez marquée 350 mW?

CUR. — Elle indique la puissance limite du transistor. Pour chacun de ses points, le produit de la tension de collecteur par son courant est égal à 350.

IG. — En effet, pour 10 V nous avons 35 mA, de même que pour 5 V nous avons 70 mA. C'est donc la limite à ne pas dépasser?

Retour des deltas.

CUR. — Oui. Cette courbe est une hyperbole. Mais nous aurons encore l'occasion d'y revenir. En attendant, je voudrais vous familiariser

avec encore une caractéristique hautement utile du transistor : sa *résistance de sortie*. Devinez-vous de quoi il s'agit?

IG. — Avec le peu de phosphore qui me reste, je le tenterai. Je suppose qu'il s'agit de la résistance qui impose son comportement au courant de collecteur quand on le fait varier en changeant la tension de ce même collecteur. Est-ce bien cela?

CUR. — Très bien, Ignotus. Ajoutez que, pendant ces variations, la base reste à un potentiel fixe. Et continuez en pensant à notre saint Ohm.

IG. — J'y suis! Cette résistance de sortie, comme il se doit, est le rapport de la tension de collecteur à son courant.

CUR. — Ce n'est pas encore la bonne définition. Il y manque quelques petits deltas...

IG. — Impossible de me tromper avec une perche aussi obligeamment tendue. Voici donc une définition à faire pâlir mon vieux prof de math. On appelle la résistance de sortie d'un transistor le rapport d'une faible variation de la tension de collecteur à la faible variation du courant de collecteur qu'elle a déterminée. Et cela s'écrit :

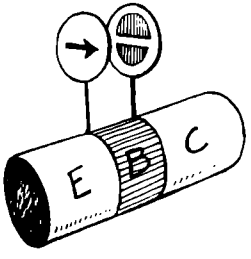
$$r_s = \frac{\Delta E_c}{\Delta I_c}$$

(ce qui correspond à $\frac{\Delta E_a}{\Delta I_a}$ = r_a des tubes).

CUR. — Votre air triomphal est justifié. La sole géante continue d'exercer sur votre intellect sa bénéfique action... Pourriez-vous, dès lors, vous fondant toujours sur le graphique de la figure 46, déterminer la résistance de sortie de notre transistor pour, disons, $E_b = 0{,}6$ V.

IG. — Très facile... Je prends deux points E et F, correspondant aux tensions de 10 et de 20 V sur le collecteur, soit une différence de 10 V, et je vois que le courant de collecteur passe de 180 à quelque chose comme 182 mA, soit un accroissement de 2 mA ou 0,002 A. Par conséquent, la résistance de sortie est égale à $10 : 0{,}002 = 5\,000\ \Omega$.

CUR. — C'est parfait. Si vous l'aviez calculée pour des valeurs plus fortes des courants, vous l'auriez trouvée encore plus faible. Mais ne l'oubliez pas, nous sommes en présence d'un transistor de moyenne puissance. Si vous prenez un modèle de faible puissance, tel que celui dont les courbes sont représentées dans la figure 48, vous auriez trouvé des résistances de sortie beaucoup plus fortes. Ces courbes, en effet, sont presque horizontales. Et même une forte augmentation de E_c n'y entraîne qu'un insignifiant accroissement de I_c. C'est dire que leur quotient s'exprime en dizaines de milliers d'ohms.



IG. — Quelle drôle de bête que ce transistor dont la résistance d'entrée est faible et celle de sortie élevée. On dirait qu'il le fait exprès pour faire la nique aux tubes... Ne peut-on, d'ailleurs admettre que la résistance d'entrée est faible parce que c'est celle de la jonction émetteur-base traversée par le courant direct. Alors que la jonction base-collecteur est péniblement franchie par le courant dans le « mauvais sens », ce qui détermine une forte résistance de sortie.

CUR. — Cette façon de voir est tout à fait légitime. Mais je crains que, pour aujourd'hui, votre provision de phosphore touche à sa fin... et votre résistance d'entrée devienne énorme.

Au cours de leur dernière conversation, Curiosus et Ignotus ont passé en revue les principales caractéristiques des transistors. Celles-ci, on l'a vu, peuvent être exprimées par des valeurs numériques de divers rapports ou, mieux, par des réseaux de courbes montrant comment certaines grandeurs varient sous l'action de certaines autres. Le mode de représentation graphique donne, des propriétés d'un transistor, une image plus complète que les caractéristiques numériques qui ne sont valables que dans des conditions bien déterminées. Car, dans les transistors, n'hésitons pas à le dire, tout dépend de tout...

Dans la causerie que l'on va lire, nos deux amis sauront tirer, des familles de courbes, de précieux renseignements sur le fonctionnement réel du transistor en amplificateur comportant une impédance de charge. Chemin faisant, ils étudieront également le problème de la polarisation et ses solutions pratiques.

★ **SOMMAIRE : Caractéristiques statiques et dynamiques. - Tracé de la droite de charge. - Point de fonctionnement. - Amplification en courant, en tension et en puissance. - Valeurs maxima de la composante alternative. - Tension de déchet. - Choix de l'impédance de charge. - Pente dynamique. - Polarisation de la base.**

DES DROITES ET DES COURBES

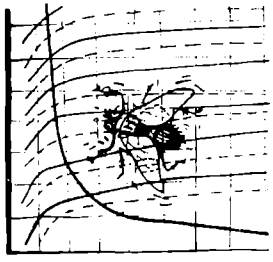
Le transistor n'est pas seul au monde.

IGNOTUS. — Depuis notre dernière rencontre, je fais des cauchemars atroces. Je rêve que je suis une mouche prise dans une géante toile d'araignée constituée par les réseaux de courbes des transistors. Je m'y débats désespérément sans pouvoir m'en échapper... N'est-ce pas affreux?

CURIOSUS. — Désolé d'avoir ainsi troublé vos nuits... Voulez-vous qu'on renonce désormais à parler de ces fameuses courbes?

IG. — Au contraire. Je voudrais que vous m'expliquiez la façon de s'en servir dans les conditions réelles d'emploi des transistors.

CUR. — Qu'entendez-vous par là?



IG. — Vous avez relevé ces courbes en variant la tension E_c appliquée entre collecteur et émetteur. Et vous l'avez fait pour diverses valeurs du courant de base I_b (ou, ce qui revient au même, pour diverses valeurs de la tension de base E_b). Mais, en réalité, notre transistor ne vit pas en égoïste, isolé du monde entier et faisant varier ses tensions et courants par pur plaisir... Il est chargé de fournir des tensions ou des courants à un autre transistor, équipant l'étage suivant. Ou bien, s'il est le dernier de la rangée, il doit procurer des watts à un haut-parleur. De toute manière, il doit avoir, dans son circuit de collecteur, une impédance de charge. Ainsi, au cas où il est suivi d'un autre étage d'amplification

et que la liaison entre eux soit à résistances et capacité, il doit y avoir une résistance R entre le collecteur et la batterie U_{ec}.

Cur. — C'est tout à fait exact. Mais qu'est-ce qui vous ennuie dans tout cela?

Encore la batterie de cuisine.

Ig. — C'est que mes tensions sur le collecteur vont maintenant dépendre de l'intensité du courant de collecteur. En effet, la véritable tension E_c entre collecteur et émetteur est plus faible que celle de la pile U_{ec}, puisqu'il faut en retrancher la chute de tension que le courant I_c produit dans la résistance de charge R. Ainsi, donc, si une variation du courant de base détermine un accroissement du courant de collecteur, la chute de tension dans R sera plus forte au détriment de la tension qui va rester sur le collecteur.

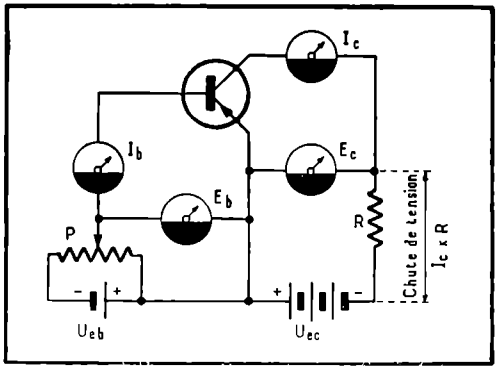
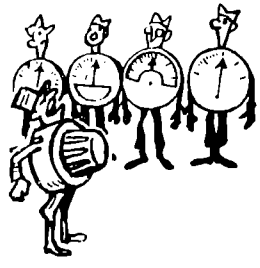


Fig. 49. — Pour relever les caractéristiques du fonctionnement réel d'un transistor, il convient de compléter le dispositif de la figure 42 par une résistance de charge R intercalée dans le circuit du collecteur. (A partir de maintenant, le transistor sera représenté dans les schémas par son symbole conventionnel.)

Cur. — C'est bien raisonné, Ignotus! Et je comprends ce qui vous trouble : nos réseaux de courbes ne rendent pas apparemment compte de ces phénomènes.

Ig. — Je pense de plus en plus à ma batterie de cuisine dont j'avais relié entre elles toutes les casseroles... Du fait de la présence de cette résistance de charge, tout est lié dans nos courants et tensions. Bougez le potentiomètre P, et vous verrez les aiguilles de nos quatre instruments de mesure s'ébranler dans un élan unanime, comme des soldats manœuvrant sous les ordres d'un officier...



Une droite parmi les courbes.

Cur. — Essayons donc de mettre un peu d'ordre dans tout cela. Prenons le cas d'un transistor de faible puissance, disons de 75 mW, dont voici les courbes, y compris, en trait interrompu gras, la limite de puissance à ne pas dépasser. Supposons que la pile U_{ec} alimentant le collecteur soit de 9 V. Dites-moi, dans quelles conditions on trouvera cette tension sur le collecteur?

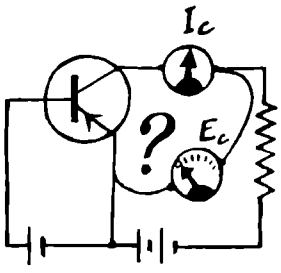
Ig. — S'il ne se produit aucune chute de tension dans R. C'est-à-dire si le courant I_c est nul.

Cur. — Et voilà un premier point A que nous allons marquer sur notre graphique pour $E_c = 9$ V et $I_c = 0$. Maintenant admettons que

notre résistance R soit de 275 Ω. Pouvez-vous calculer pour quelle valeur du courant de collecteur, il ne restera plus aucune tension sur ledit collecteur?

IG. — Bien entendu, en appliquant la loi d'Ohm, je peux trouver l'intensité I_c qui, dans une résistance R de 275 Ω, déterminera une chute de tension E de 9 V de manière à annuler la tension de la pile U_{cc} :

$$I_c = \frac{E}{R} = \frac{9}{275} = 0{,}0325 \text{ A} = 32{,}5 \text{ mA}$$



CUR. — Parfait! Cela nous permet de marquer notre deuxième point B pour $E_c = 0$ et $I_c = 32{,}5$ mA. Il ne reste plus qu'à prendre une

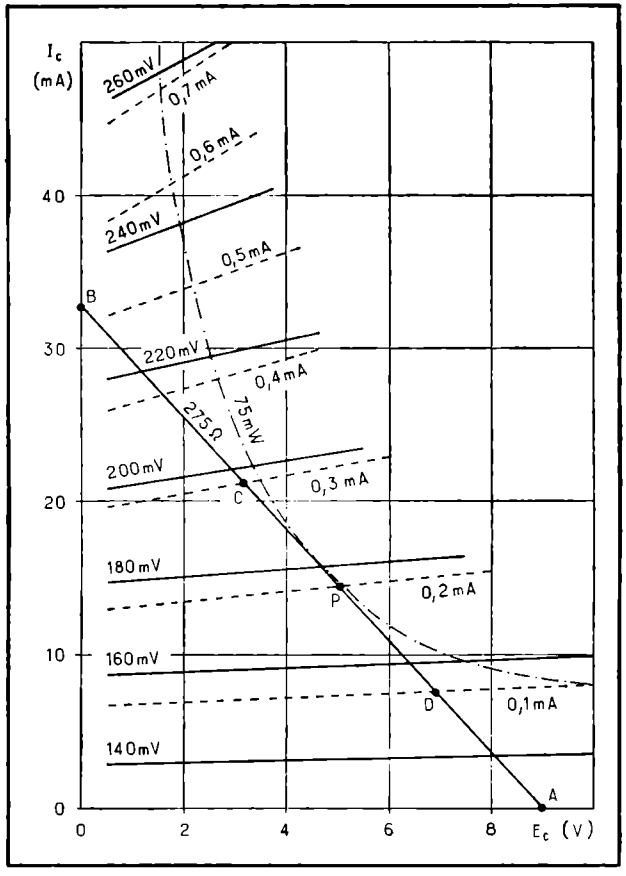
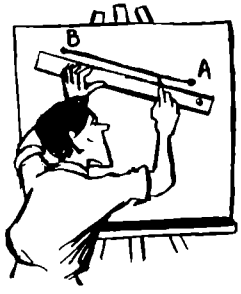


Fig. 50. — Courbes d'un transistor de faible puissance.



règle et à réunir nos points A et B par une belle droite qui est la *droite de charge* pour 275 Ω.

IG. — Et nous voilà bien avancés! Car je ne vois pas à quoi correspond cette « droite de charge ». Et, pour commencer, comment voulez-vous que le courant de collecteur atteigne ces 32,5 mA si, à ce moment-là, il n'y a plus aucune tension sur le collecteur?

CUR. — Votre confusion est due au fait que vous n'établissez pas une différence entre les *caractéristiques statiques* et les *caractéristiques dynamiques*. Les premières montrent comment varient les tensions et les

courants qui nous intéressent en l'absence d'une charge dans le circuit de collecteur. C'est ce que nous avons examiné avec vous lors de notre précédente causerie. Aujourd'hui, nous voulons voir ce qui se passe quand une charge est placée dans le circuit de collecteur et — c'est ce que nous avons jusqu'ici omis de préciser — lorsqu'une tension alternative v_b est appliquée à l'entrée, c'est-à-dire entre la base et l'émetteur. Dès lors, ce sont les caractéristiques dynamiques qui rendent compte du fonctionnement du transistor; et la droite de charge que nous venons de tracer en est une.

Les deux composantes.

IG. — Je vois sur votre schéma que la tension alternative d'entrée v_b donne lieu à la tension alternative de sortie v_c. Et je commence à entrevoir la vérité. Il se passe ici, dans le circuit de collecteur, la même chose que dans le circuit anodique des tubes électroniques : la coexistence pacifique de deux courants. Il y a, d'une part, une composante continue, ce courant moyen qui est déterminé par le point de fonctionnement (en l'occurrence, la polarisation de la grille). Et puis, il y a la

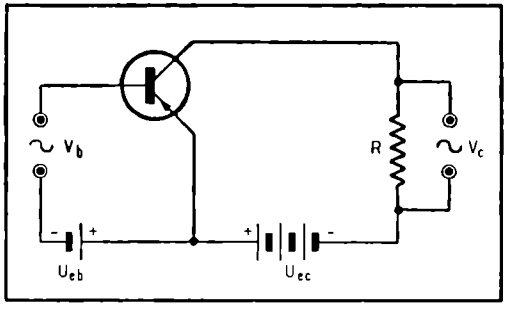
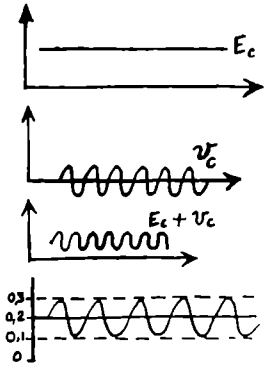


Fig. 51. — A l'entrée d'un étage équipé d'un transistor, on a une tension alternative v_b appliquée entre base et émetteur. A la sortie, sur la résistance de charge R, on recueille une tension alternative v_c.



composante alternative, due aux variations du potentiel de la grille par rapport à la cathode. Et ses alternances viennent tantôt s'ajouter à la composante continue (quand les deux vont dans le même sens), tantôt s'en retrancher.

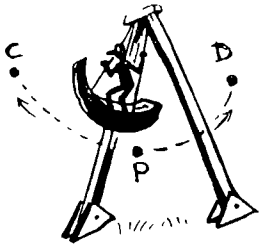
CUR. — Ça commence à aller mieux, Ignotus... Effectivement, nous avons la même chose dans le transistor. La pile U_{eb} fixe le point de fonctionnement. Il y a intérêt à le placer de telle manière que les pointes de la tension variable v_c développée à la sortie puissent avoir la plus grande amplitude possible.

IG. — Dans ce cas, nous devons nous arranger pour que la tension moyenne E_c restant sur le collecteur soit égale à la moitié de sa tension d'alimentation U_{cc}. Dans notre cas, ce sera la moitié de 9 V, soit 4,5 V.

CUR. — Je place donc un point P sur notre droite de charge, à E_c = 5 V. Il est ainsi presque au milieu de notre droite. Vous verrez tout à l'heure que l'on peut adopter une valeur légèrement supérieure à la moitié de U_{cc}. Dès lors, si une variation de la tension base-émetteur (ou, ce qui revient au même, une variation du courant de base) détermine des variations du courant I_c et de la tension E_c de collecteur, ces deux grandeurs seront toujours liées par la relation qu'exprime notre droite.

IG. — C'est très philosophique, mais j'aimerais mieux un exemple concret.

Jeux de balançoire.



Cur. — Eh bien, admettez que vous appliquiez entre base et émetteur une tension alternative d'une amplitude d'environ 20 mV, qui crée des variations du courant de base d'une amplitude de 0,1 mA de part et d'autre du courant moyen qui, au point P, est de 0,2 mA.

Ig. — En sorte que le courant de base oscillera entre

$$0{,}2 + 0{,}1 = 0{,}3 \text{ mA} \quad \text{et} \quad 0{,}2 - 0{,}1 = 0{,}1 \text{ mA}.$$

Cur. — Très exactement. Pour la première valeur, nous atteindrons, sur la droite de charge, le point C (où elle coupe la courbe $I_b = 0{,}3$ mA). Et pour la seconde, nous passerons au point D (croisement avec la courbe $I_b = 0{,}1$ mA).

Ig. — En sorte que les valeurs instantanées de E_c et I_c oscilleront entre ces deux points C et D le long de la droite de charge comme si elles faisaient de la balançoire autour du point d'équilibre P?

Cur. — C'est bien cela. Vous voyez que la tension de collecteur oscille entre 3,2 V et 6,8 V autour du point P qui est à 5 V.

Ig. — Cela fait une amplitude de 1,8 V. Et, comme cela correspond à une amplitude de 20 mV = 0,02 V sur la base, puis-je en conclure que nous avons une amplification de tension de 1,8 : 0,02 = 90 fois?

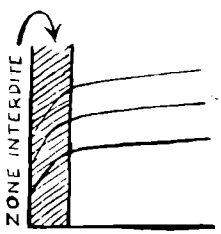
Cur. — Je ne vous en empêcherai pas. Et pour l'amplification en intensité?

Ig. — Pas plus difficile. Entre les points C et P d'une part, et P et D, d'autre part, le courant I_c de collecteur varie de 7 mA. Cette variation est provoquée par une variation de 0,1 mA du courant de base. Par conséquent, l'amplification en intensité est de 7 : 0,1 = 70 fois.

Cur. — Je commence à croire que vous avez encore bien rechargé votre cerveau en phosphore, faisant des ravages dans une poissonnerie... Maintenant, vous comprenez que la puissance — qui est le produit de la tension par l'intensité — a été de son côté amplifiée...

Ig. — ... $90 \times 70 = 6\,300$ fois. C'est prodigieux!

Gare aux distorsions!



Cur. — Rien de plus normal. Mais ce que je voudrais vous faire comprendre, c'est que nous ne devons pas dépasser une amplitude de 4,5 V pour la tension alternative v_c sur le collecteur. Avec cette amplitude, les valeurs de E_c et I_c se promèneront tout le long de la droite de charge, de A à B. En effet, en admettant que le point de fonctionnement soit placé au milieu exact de AB, l'une des alternances atteindra l'un de ces points et l'autre alternance parviendra à l'autre point.

Ig. — En somme, ce sont les limites des valeurs instantanées de la tension E_c de collecteur?

Cur. — Oui. Et, en fait, il ne faut pas qu'elle tombe à zéro en atteignant le point B. Car les courbes caractéristiques du réseau y cessent d'être droites. Vous avez vu, dans la figure 46 et encore mieux dans la 48, comment elles s'infléchissent aux faibles valeurs de E_c. Voilà pourquoi il reste une zone de quelques dizièmes de volt, dite *tension de déchet,* qui est interdite sous peine de distorsions.

Ig. — On peut donc fixer le point P non pas au milieu de la tension de la pile U_{cc} mais à une valeur un peu plus élevée?

CUR. — Certes, si l'on veut être rigoureux. Et voilà pourquoi (1) nous l'avons placé à 5 V.

IG. — J'ai l'impression que ce n'est pas par un pur hasard que vous avez pris une valeur de 275 Ω pour la résistance de charge R. Qu'aurait donné une valeur différente?

Gerbe de droites.

CUR. — Voici quelques droites de charge pour des valeurs supérieures ou inférieures. Pour 1 000 Ω nous obtenons des puissances plus faibles et disposons d'une moindre amplitude des variations des courants

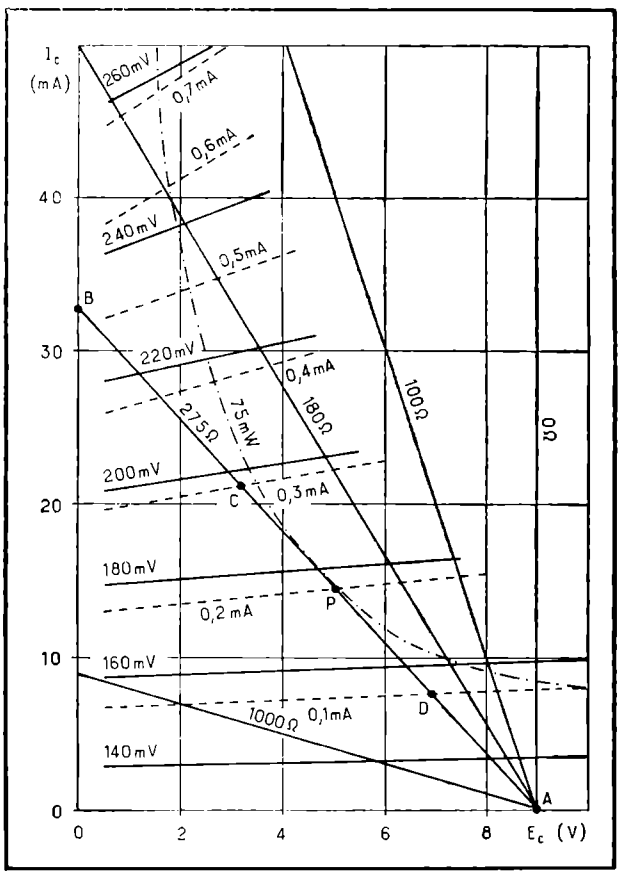


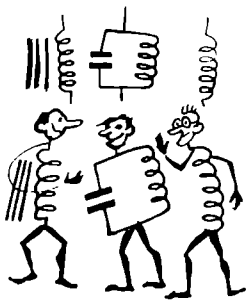
Fig. 52. — Droites de charge pour différentes valeurs de R. Leur inclinaison est d'autant plus grande que R est plus faible. Pour R nul, la droite se dresse verticalement.

et des tensions, tant à l'entrée (base) qu'à la sortie (collecteur). Par contre, pour des valeurs inférieures à 275 Ω, les amplitudes et les puissances augmentent... mais nous entrons dans le domaine interdit des puissances supérieures à 75 mW.

(1) Curiosus triche un peu : s'il a placé P à 5 V, c'est surtout pour avoir ce point sur la courbe I_b = 0,2 mA, ce qui facilite la lecture des diverses valeurs des tensions et des courants. (*Note de l'Auteur.*)

IG. — Voilà pourquoi, malin que vous êtes, vous avez choisi cette valeur de 275 Ω qui vous permet d'avoir une droite de charge tangente à l'hyperbole qui marque la puissance limite... Je vois que vous avez même tracé la droite de charge pour R nul.

CUR. — Oui, Ignotus. Et cette belle droite, parfaitement verticale, est, parmi toutes nos caractéristiques dynamiques, l'unique caractéristique statique. En l'absence de résistance de charge, la tension sur le collecteur ne demeure-t-elle pas constante et immuable?



IG. — C'est évident. Mais n'avons-nous pas, naguère, étudié avec vous des impédances de charge autres qu'une vulgaire résistance ohmique? J'ai encore présente à l'esprit cette belle famille d'impédances que vous me fîtes connaître et qui comprend des inductances et des circuits résonnants.

CUR. — Vous avez tout à fait raison de m'en parler. Bien entendu, pour ce genre d'impédances, on peut faire abstraction de leur résistance ohmique en courant continu. Dans ces conditions, le point de fonctionnement du collecteur est à la tension même de sa batterie d'alimentation U_{cc}. On peut alors, sans risque d'inverser la polarité du collecteur, développer dans notre impédance des tensions dont l'amplitude peut

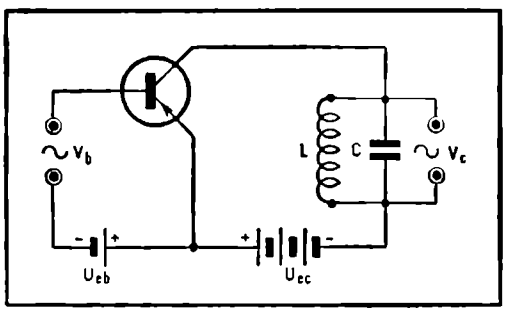
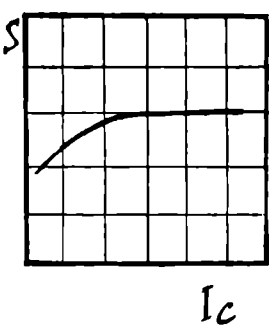


Fig. 53. — La charge peut être constituée par une impédance autre qu'une résistance ohmique. Ci-contre, elle est représentée par un circuit accordé sur la fréquence du signal.

atteindre la valeur de la tension U_{cc}. Et le point A (où la droite de charge coupe l'axe horizontal E_c) peut alors être placé à la valeur double de la tension de la batterie U_{cc}. Ainsi, au cas où celle-ci est de 9 V, le point A sera placé à 18 V.

IG. — En résumé, pour tracer une droite de charge, je fixe le point A sur l'axe horizontal en U_{cc} ou 2 U_{cc} selon que l'impédance est ohmique ou non, et je marque le point B sur l'axe vertical à la valeur U_{cc} : R ou $I_c = 2\ U_{cc} : Z$ selon le genre de l'impédance.



CUR. — Vous avez parfaitement formulé la règle et, je l'espère, vous saurez tracer des droites de charge sans la moindre difficulté. Et vous saurez aussi en tirer une foule de renseignement. Rien de plus facile, par exemple, que de dresser, partant de là, la courbe montrant comment le courant de collecteur I_c varie en fonction de la tension de base E_b. Il suffit de relever, sur la droite de charge, les valeurs de I_c pour tous les points où elle coupe les courbes E_b et de les porter dans un graphique. Vous voyez qu'en l'occurrence nous obtenons une droite. Cela montre que les variations de la pente sont faibles lorsqu'il s'agit de valeurs élevées du courant de collecteur. Le transistor amplifie alors d'une manière suffisamment linéaire.

IG. — Et je constate que la pente est ici de 300 mA/V.

CUR. — Oui. C'est la *pente dynamique*. Vous auriez pu, avec la même facilité, tracer la courbe montrant la variation de I_c en fonction de I_b.

Une seule batterie - toutes les tensions.

IG. — Assurément. Mais, telle une mouche prise dans une toile d'araignée, j'ai hâte de sortir de ces réseaux de courbes qui me font, en état de veille, revivre mes cauchemars nocturnes... Depuis un moment, j'ai une question sur le bout de la langue. Dans tous vos schémas, vous

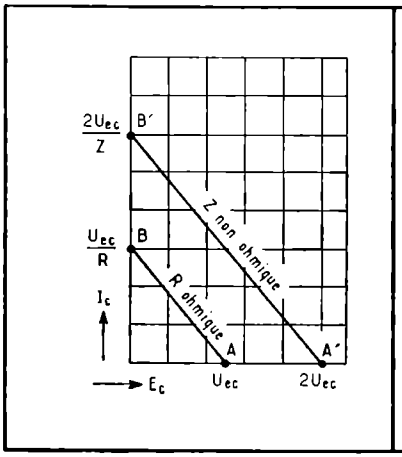


Fig. 54. — Règle générale pour l'établissement des droites de charge.

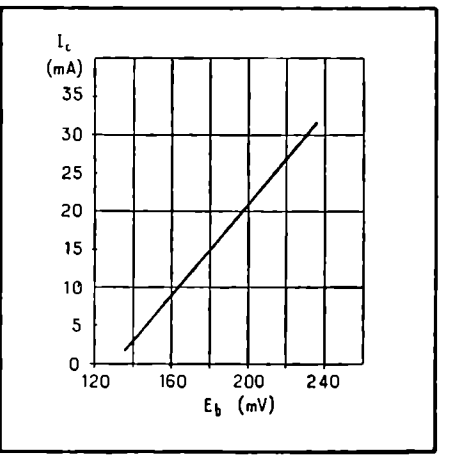
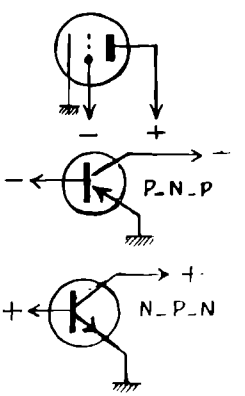


Fig. — 55. — Cette courbe montrant la variation du courant de collecteur I_c en fonction de la base E_b est établie d'après les valeurs de ces deux grandeurs tirées de la droite de charge de la figure 50.

faites figurer deux batteries : U_{cc} donnant la tension du collecteur et U_{eb} servant à polariser convenablement la base. Or, j'ai autopsié tous les récepteurs à transistors de mes amis et ai constaté qu'ils ne contenaient qu'une seule batterie, soit de 4,5 V, soit de 6 V, soit de 9 V. C'est évidemment celle qui alimente le collecteur. D'où vient donc la tension de polarisation pour la base?

CUR. — De cette même batterie. N'en est-il, d'ailleurs, pas de même pour les tubes?

IG. — En effet, c'est la source du courant anodique qui crée la tension de polarisation de grille; le courant anodique provoque une chute de tension dans une résistance placée entre le retour de grille et la cathode, en rendant cette dernière positive par rapport à la grille ou, en d'autres termes, en rendant la grille négative par rapport à la cathode... Fait-on la même chose dans le transistor en créant une chute de tension dans une résistance disposée sur le trajet du courant de collecteur?



CUR. — Non, Ignotus. Pour le transistor les choses sont, cette fois-ci, plus simples que pour la lampe. Dans celle-ci l'anode doit être positive et la grille négative par rapport à la cathode. En revanche, dans un transistor P-N-P, et le collecteur et la base doivent être négatifs par rapport à l'émetteur.

IG. — De même que dans un modèle N-P-N, collecteur et base devraient, tous les deux, être positifs par rapport à l'émetteur. Je devine

donc qu'il suffit de placer aux bornes de notre batterie un diviseur de tension constitué par deux résistances R_1 et R_2 pour procurer à la base la tension dont elle a besoin.

CUR. — C'est exact, ami. Et, pour appliquer à la base les tensions alternatives d'entrée, on utilise un condensateur de liaison C. On peut, cependant, assurer la polarisation de la base encore plus simplement, à l'aide d'une seule résistance R_p, la reliant au pôle de la batterie qui

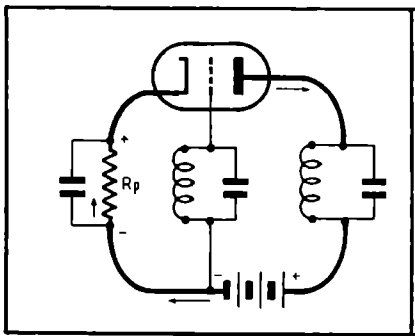


Fig. 56 (ci-dessus). — C'est ainsi que dans un étage à tube électronique, la polarisation de la grille est assurée par la chute de tension que le courant anodique détermine dans la résistance R_p.

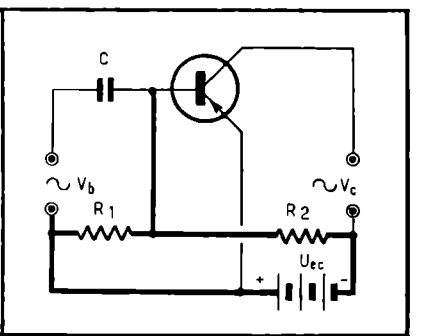


Fig. 57 (en haut à droite). — Mode de polarisation de la base à l'aide d'un diviseur de tension.

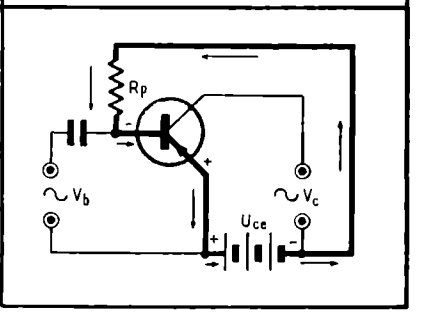


Fig. 58 (ci-contre). — Assez souvent, la polarisation est assurée par une résistance R_p en série avec la jonction base-émetteur.

alimente le collecteur, pôle négatif dans le cas du transistor P-N-P (ou positif pour le N-P-N).

IG. — Je vois ce qui se passe. Vous faites passer à travers R_p un courant allant de la base vers l'émetteur.

CUR. — Et ce courant, Ignotus, est appelé *courant de polarisation*. C'est justement ce courant qui fixe le point de fonctionnement. Ainsi, dans le cas du point P de la figure 50, il s'agit d'un courant de 0,2 mA ou 0,0002 A. Avec une pile de 9 V et en négligeant la résistance de la jonction base-émetteur (qui est faible dans le sens de la conduction), quelle devra être la valeur de R_p?

IG. — Si l'on doit en croire la loi d'Ohm, nous obtiendrons R_p en divisant 9 par 0,0002, ce qui donne 45 000 Ω.

CUR. — Vous voyez que tous nos calculs ne dépassent pas, en difficulté, une simple multiplication ou division...

IG. — N'empêche que je me sens la tête farcie de courbes, de droites et d'un magma de grandeurs électriques. Pourvu que cela se tasse d'ici notre prochaine rencontre...

Dans les montages à tubes électroniques, on recourt volontiers à la contre-réaction en vue de réduire les distorsions et d'atténuer l'influence des fluctuations des tensions d'alimentation. Lorsqu'il s'agit des montages à transistors, la contre-réaction est capable de rendre les mêmes services. Et, de surcroît, elle peut neutraliser, dans une certaine mesure, l'action des variations de température auxquelles les semiconducteurs sont, on le sait, très sensibles.

En examinant ces diverses applications de la contre-réaction, nos jeunes amis constateront, en même temps, que le transistor est, par sa nature même, doué d'une certaine contre-réaction interne. Ce qui prouve plus que jamais que tout y dépend de tout...

★ **SOMMAIRE : Les bienfaits de la contre-réaction. - Contre-réaction d'intensité et de tension. - Montages à tubes et à transistors. - Action de la contre-réaction sur les résistances d'entrée et de sortie. - Distorsion de phase introduite par les transistors. - Contre-réaction interne. - Effets de température sur la distorsion. - Leur compensation par la contre-réaction. - Emploi des thermistances.**

CHOCS EN RETOUR

La réalité dépasse la fiction.

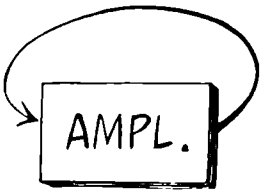
CURIOSUS. — Que vois-je, Ignotus? Vous êtes en train de brûler un tas de livres! Que signifie cet autodafé?

IGNOTUS. — J'y fais passer ma bibliothèque de science-fiction. A quoi bon garder ces œuvres d'anticipation, puisque la réalité a largement dépassé l'imagination de leurs auteurs? Et, à ce propos, je voulais vous poser une question au sujet de ces immenses ballons qui, à l'altitude de 35 000 kilomètres, tournent autour de la Terre, à la vitesse d'un tour par vingt-quatre heures, en sorte qu'ils demeurent toujours au-dessus du même point du globe.

CUR. — Vous savez bien qu'ils permettent d'établir des communications radioélectriques à longue distance, par réflexion des ondes contre leur enveloppe métallisée, et que l'on peut, ainsi, réaliser des liaisons à longue portée pour la télévision.

IG. — Ça, je le savais. Mais ce qui m'intrigue dans l'histoire de ces satellites artificiels, c'est le fait que les ballons ne sont gonflés qu'une fois placés sur leur orbite, ce qui, j'imagine, complique pas mal les choses.

CUR. — Voyons, Ignotus! N'avez-vous pas compris qu'un ballon d'un pareil diamètre serait absolument incapable de se mouvoir à une vitesse de plus de 11 kilomètres/seconde à travers l'atmosphère terrestre? Par contre, dans le vide qui règne à l'altitude où il évolue, rien n'oppose de résistance à son avance.



IG. — J'avoue que cela crève les yeux, et j'ai honte de ne pas y avoir pensé. Et, pourtant, je connais bien cette bonne vieille loi de Newton, qui veut que chaque action rencontre une action en sens opposé et de même valeur. C'est, en somme, la contre-réaction que nous avons naguère étudiée en radio.

Questions de correction.

CUR. — Pas tout à fait, ami. Certes, la contre-réaction suppose, elle aussi, une action en sens inverse qui vient contrarier une action donnée (autrement dit, une opposition de phase). Mais, il ne faut pas oublier que, telle que nous l'envisageons, elle est réalisée en réinjectant, à l'entrée d'un amplificateur, une partie de l'énergie prélevée à sa sortie. Il y a donc...

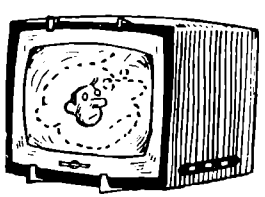
IG. — ... une sorte de choc en retour. C'est un peu ce qui m'arrive quand je commets une bêtise et que, pour me corriger, moi-même, j'ai envie de me donner des coups de pied quelque part...

CUR. — Le mot « corriger » est bien de circonstance. En effet, je vous le rappelle, la contre-réaction est une sorte de panacée; elle réduit toutes les distorsions : les linéaires (en fonction de la fréquence), les non-linéaires (celles qui dépendent de l'amplitude et introduisent des harmoniques indésirables) et, enfin, les distorsions de phase.

IG. — Oui, je me souviens. Tout cela est atténué, du fait que la tension de sortie, qu'on réinjecte dans l'entrée en opposition de phase, contient justement toutes ces distorsions. Elles viennent donc en sens contraire, en annulant, en fin de compte, toutes les altérations prenant naissance dans l'amplificateur.

CUR. — Bravo, Ignotus! Vous n'avez rien oublié. Saviez-vous que, de surcroît, la contre-réaction pallie les perturbations qui peuvent être dues aux variations des tensions d'alimentation?

IG. — C'est bien précieux. Il faudra que j'ajoute des circuits de contre-réaction dans tous les étages du téléviseur installé dans notre maison de campagne. Le secteur électrique y est très instable. Et l'image subit, de ce fait, des fluctuations fort curieuses : tantôt, elle est trop sombre; tantôt, trop lumineuse. De plus, ses dimensions mêmes varient, et je vois la tête des personnages, sur l'écran, se dilater ou se rétrécir... ce qui ne manque pas de piquant.



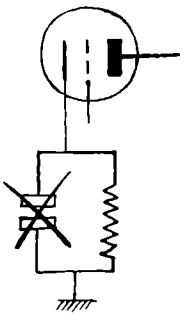
CUR. — Eh bien, la contre-réaction est un bon remède à cet état de choses, puisque toute perturbation se manifestant à la sortie par une déformation quelconque est corrigée en réinjectant le signal déformé à l'entrée. Cependant, dans votre cas, un stabilisateur de tension, placé entre le secteur et le téléviseur, serait plus indiqué.

IG. — Pourquoi? Puisque la contre-réaction n'a que des avantages!

Retour aux lampes.

CUR. — Vous êtes encore très jeune, ami. Vous ne savez pas encore, qu'ici-bas, tout se paie. Si la contre-réaction réduit les distorsions, elle fait également diminuer le gain des amplificateurs. Voilà pourquoi son usage n'est possible que lorsqu'on dispose d'une marge de gain suffi-

sante... Pourriez-vous, Ignotus, puisqu'on en parle, tracer les schémas des principaux modes de contre-réaction employés dans les amplificateurs à lampes?



Ig. — On peut faire de la contre-réaction en intercalant, entre la cathode et le négatif de la source de tension anodique, une résistance R_r sans condensateur de découplage. C'est, à ce détail près, le même schéma que celui de la polarisation par résistance dans le circuit de la cathode, que j'avais dessiné lors de notre dernière causerie (fig. 56). Mais ce « petit détail » change tout. Maintenant, quand une tension rend la grille

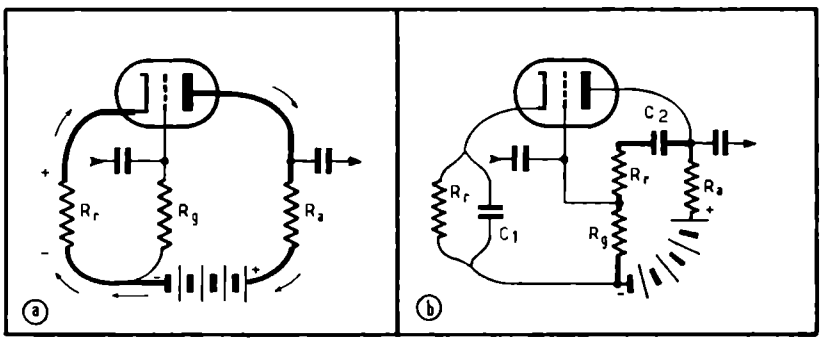
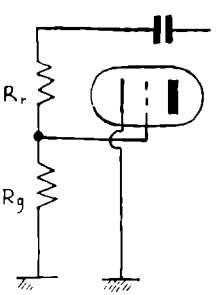


Fig. 59. — Contre-réaction dans un étage à tube électronique. — En a, contre-réaction d'intensité déterminée par la présence d'une résistance commune R_r dans les circuits de grille et d'anode. — En b, contre-réaction de tension obtenue en appliquant à la grille une fraction de la tension alternative développée sur la résistance de charge R_a et prélevée, à travers C_2, par le diviseur de tension R_r-R_g. — Cette façon de présenter les schémas n'est pas habituelle. Elle a, cependant, l'avantage d'être claire en mettant en évidence le mécanisme de la contre-réaction.

plus positive, le courant anodique croit et, en traversant R_r, augmente la chute de tension, ce qui rend la grille plus négative, c'est-à-dire tend à s'opposer à l'action initiale du signal.



Cur. — C'est merveilleux, Ignotus. Vous commencez à vous expliquer aussi clairement que mon cher oncle Radiol qui, jadis, m'avait inculqué les principes élémentaires de radio... En effet, votre premier montage assure la contre-réaction sous l'action du courant anodique. Voilà pourquoi on l'appelle *contre-réaction série d'intensité*.

Ig. — Dans ce cas, il faudra appeler *contre-réaction shunt de tension* celle qui se produit dans mon deuxième montage. Car, ici, je réinjecte vers la grille les tensions alternatives développées dans la résistance de sortie R_a. Je le fais à l'aide d'une résistance R_r. Et, bien entendu, je sépare les tensions continues par le condensateur C_2.

Cur. — C'est juste. Appliquez-vous à la grille la totalité de la tension de sortie?

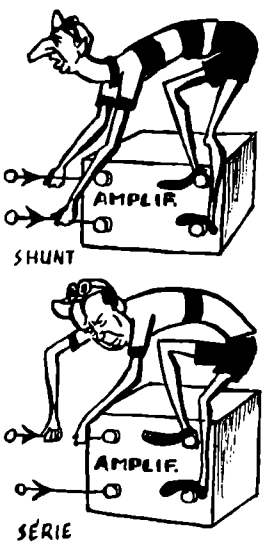
Ig. — Oh non! Ce serait excessif. En fait, les résistances R_r et R_g constituent un diviseur de tension permettant de n'appliquer à la grille que la fraction de la tension de sortie qui reste sur R_g. Et, comme on

prend R_r de valeur beaucoup plus élevée que R_E, la grille ne reçoit qu'une faible partie de la tension de sortie (1).

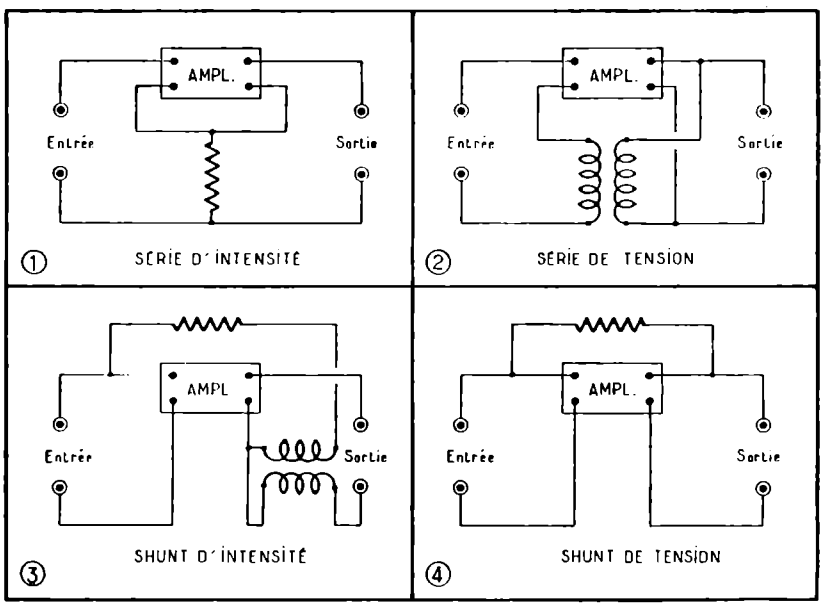
En passant au transistor.

CUR. — Par vos lumineuses explications, vous m'avez grandement simplifié la tâche. Car — le hasard fait vraiment bien les choses — j'allais justement vous parler de la contre-réaction dans les transistors. Voici donc les schémas de contre-réaction d'intensité et de contre-réaction de tension, appliqués aux triodes à cristal. On les désigne aussi par les termes de *contre-réaction série* et *parallèle* (ou *shunt*).

IG. — Laissez-moi m'y reconnaître. Dans votre premier schéma, je vois une résistance R_r qui est commune aux circuits de base et de collecteur. C'est exactement comme dans mon schéma à lampe, où la résistance de contre-réaction était commune aux circuits de grille et d'anode. Son action doit donc être identique. Si vous le permettez, je vais cependant recourir à notre méthode éprouvée des polarités.



(1) En fait, on peut distinguer quatre modes de contre-réaction schématisés dans nos dessins. La contre-réaction peut être appliquée à l'entrée de l'amplificateur soit en *série* soit en *parallèle* (*shunt*) avec le signal initial. Elle peut être engendrée par le courant de sortie (contre-réaction d'*intensité*) ou par la *tension* qu'il développe sur l'impédance de sortie.



Les modes *1* et *4* sont les plus couramment employés dans le cas d'un seul étage. On trouve les modes 2 et 3 dans les étages débitant sur un transformateur et quand on applique la contre-réaction sur deux étages (voir, par exemple, la figure 61) où l'on utilise une contre-réaction série de tension

CUR. — Je vous y engage vivement.

IG. — Admettons qu'une alternance du signal à l'entrée rende la base plus négative. Le courant du collecteur en sera accru. Et, en raison de la chute de tension dans R_r, l'émetteur sera rendu plus négatif par rapport à la base, ou, ce qui est la même chose, la base deviendra plus

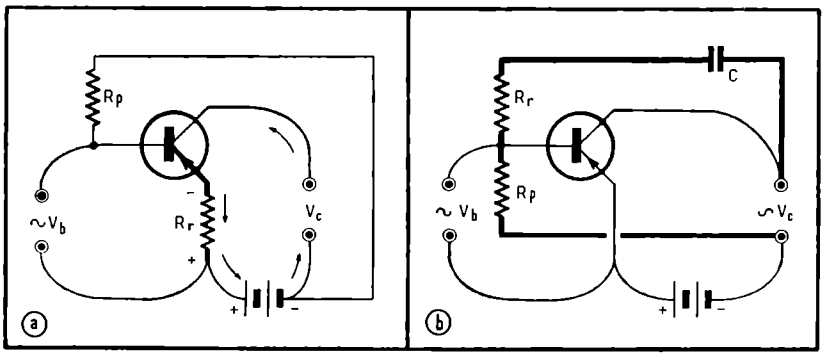
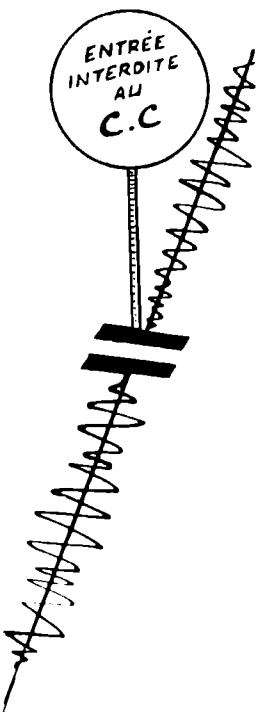


Fig. 60. — Transposition dans le domaine des transistors des deux méthodes de contre-réaction de la figure 59. — En a, contre-réaction d'intensité (ou montage série) avec résistance R_r commune aux circuits de base et de collecteur. En b, contre-réaction de tension (ou parallèle) où une fraction de la tension de collecteur est réinjectée dans la base à travers C alimentant le diviseur de tension R_r-R_p.



positive par rapport à l'émetteur. Eh oui : ici encore, c'est bien une contre-réaction, puisque le choc en retour se produit dans le sens opposé au choc initial.

CUR. — Vous avez parfaitement analysé la situation. Passons maintenant au deuxième schéma.

IG. — Là encore, l'analogie avec le montage équipé d'un tube éclate avec évidence. Vous avez habilement utilisé la résistance de polarisation de la base R_p, pour former, avec la résistance R_r, un diviseur de tension en dérivation sur l'impédance de sortie. De la sorte, une fraction de la tension de sortie v_s est appliquée entre base et émetteur, c'est-à-dire réinjectée à l'entrée du transistor et, bien entendu, en opposition de phase. De plus, le condensateur C, tout en laissant passer les tensions alternatives, sépare les continues; ainsi le potentiel continu de la base ne dépend-il que de la résistance R_p.

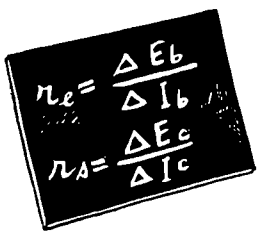
CUR. — C'est parfait. Notez, en passant, que, si le condensateur C est de valeur insuffisante, il laissera passer moins facilement les fréquences faibles, qui, de ce fait, subiront l'effet de contre-réaction dans une mesure moindre que les fréquences élevées.

IG. — Autrement dit, le gain sera moins réduit pour les notes graves, ce qui les favorisera. C'est là un moyen d'action sur la tonalité, pas très loyal, à mon sens, car du coup, les distorsions sont moins bien neutralisées. Mais, pour rendre moins criards les récepteurs portatifs, ce mode de variation de tonalité doit être bien utile.

CUR. — Je vois que vos accumulateurs du cerveau sont bien chargés en phosphore. Aussi, je n'hésite pas à leur demander un petit effort pour me dire ce que deviennent les résistances d'entrée et de sortie d'un transistor, quand on applique la contre-réaction série.

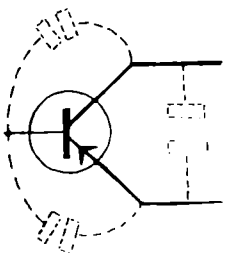
Encore un peu de « deltas ».

IG. — Reprenons nos « deltas ». La résistance d'entrée, c'est le rapport d'une faible variation de la tension de base à la faible variation du courant de base qu'elle entraîne. Ici, en raison de la contre-réaction, les mêmes variations de la tension à l'entrée, auront moins d'effet sur le courant de base. Autrement dit, pour le même ΔE_b, nous aurons un ΔI_b plus faible. Par conséquent, leur quotient, qui est la résistance d'entrée, va augmenter.



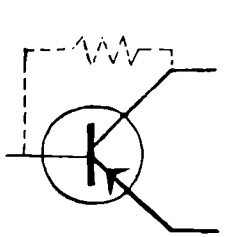
CUR. — Bien raisonné. Je ne voudrais pas mettre vos accumulateurs mentaux à plat, et vous dirais qu'en analysant, de la même façon, le comportement de la résistance de sortie, vous auriez vu qu'elle aussi, augmente à cause de la contre-réaction. Quant à la contre-réaction parallèle, celle-ci entraîne une diminution de la résistance d'entrée et aussi une légère diminution de la résistance de sortie.

IG. — Je suis de plus en plus effaré par la ressemblance que le transistor offre avec ma batterie de cuisine reliée. Dès qu'on y touche à quelque chose, tout se met en branle. Faut-il vraiment appliquer la contre-réaction pour embrouiller davantage les choses?



CUR. — Ne croyez pas, Ignotus, qu'on le fait uniquement pour vous compliquer la vie. La contre-réaction réduit les distorsions qui, dans les transistors, sont aussi dangereuses que dans les tubes. Et même davantage en ce qui concerne les distorsions de phase. Car, dans les transistors utilisés pour l'amplification en basse fréquence, les capacités entre émetteur, base et collecteur sont de valeurs relativement élevées. C'est dire que la phase des signaux amplifiés en est affectée. D'autre part, lorsque la tension des piles alimentant les montages à transistors commence à tomber, la contre-réaction, grâce à son effet régulateur, permet de les utiliser encore, du moins jusqu'à une certaine limite.

Encore une contre-réaction!



IG. — C'est évidemment très précieux et constitue une sérieuse source d'économie.

CUR. — Je vois que ces considérations bassement financières vous réconcilient avec la contre-réaction. Notez, en passant, que, même si vous n'en vouliez pas, vous seriez obligé de la subir, présente et invisible.

IG. — Quel est ce mystère?

CUR. — Le transistor présente un phénomène de *contre-réaction interne*, à peu près absent dans les tubes. Il est dû à l'existence de la résistance interne de la jonction base - collecteur, et dont la valeur est de quelques centaines de kiloohms.

IG. — Comment se manifeste donc cette contre-réaction interne?

CUR. — En transmettant à la base une faible fraction des tensions alternatives de sortie. On peut la mesurer en faisant varier la tension de collecteur (en l'absence d'une charge) et en mesurant la variation que

cela entraine dans la tension de base. En général, la variation de E_b ne représente que quelques dix-millièmes de la variation de E_c. Autrement dit, le taux de *contre-réaction interne* est de l'ordre de 0,05 % en moyenne. On le désigne par la lettre μ (« mu » grec).

Ig. — J'ai le vague sentiment que vous m'avez charitablement épargné la définition $\mu = \Delta E_b : \Delta E_c$, ce dont je vous remercie... Mais, puisque ce μ est si faible, la contre-réaction n'exerce qu'une influence négligeable.

Cur. — Oui, à la condition que la résistance de charge soit faible par rapport à la résistance de sortie, ce qui est, le plus souvent, le cas.

Questions de phase.

Ig. — Vous devinez, Curiosus, que j'ai hâte de passer à l'étude de réalisations pratiques. J'avais, d'ailleurs, promis à mon oncle Jules de lui

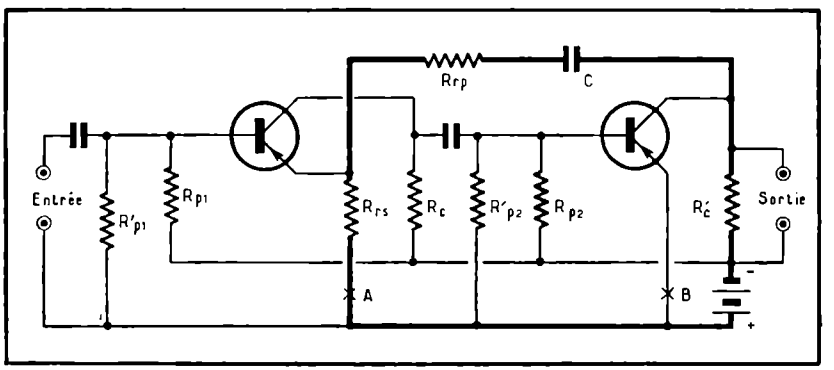


Fig. 61. — Contre-réaction mixte, série-parallèle, sur deux étages d'un amplificateur B.F.

monter un récepteur à transistors perfectionné, pour qu'il puisse l'emporter avec lui, à Dakar, où il veut, au soleil, soigner ses rhumatismes. Je projette d'y mettre un amplificateur B. F. à deux étages. Puis-je établir une contre-réaction globale sur ces deux étages, en réinjectant la tension de sortie à l'entrée?

Cur. — Oui. Cependant, avec les transistors, il ne faut pas faire la contre-réaction sur plus de deux étages. Car, en raison de ces capacités internes dont je vous entretenais tout à l'heure, la phase tourne dans chaque étage. Et, avec plus de deux étages, on ne sait plus où on en est.

Ig. — Autrement dit, on risque de faire de la réaction plutôt que de la contre-réaction?

Cur. — Ce n'est guère impossible... Mais voici un schéma qui vous plaira. Ce sont justement deux étages B. F. à liaison par résistances et capacités. Et nous prélevons la tension de sortie pour, à travers le condensateur C et à l'aide des résistances R_{rp} et R_{rs}, en appliquer une fraction à l'émetteur du premier transistor.

Ig. — Ça alors! Pourquoi donc pas à la base, comme vous l'avez fait pour un étage?

Cur. — Parce que chaque étage détermine une inversion de phase. Aussi, après deux étages, retrouvons-nous la phase des tensions appliquées à l'entrée. Il n'est donc pas question d'injecter les tensions de sortie dans la base (ce qui ferait de la réaction, donc un terrible accrochage). En revanche, en les appliquant à l'émetteur, nous faisons de la bonne contre-réaction. Et, de surcroît, la résistance R_{r_3} ajoutera encore, pour sa part, un effet de contre-réaction série sur le premier étage.

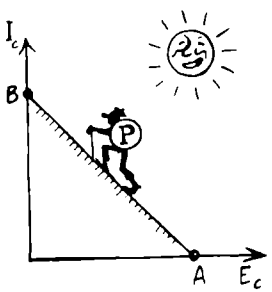
Ig. — C'est magnifique! Voilà un montage qui fera le bonheur de mon oncle.

Ça commence à chauffer.

Cur. — Je crains que non. Car autant les rayons du soleil tropical seront bénéfiques pour lui, autant ils seront néfastes au récepteur.

Ig. — Ah! oui : l'action de la température sur les semiconducteurs. Faudra-t-il poser une vessie de glace sur le récepteur? Et, d'abord, en quoi l'accroissement de l'intensité du courant, dû à l'élévation de la température, affecte-t-il le fonctionnement d'un récepteur?

Cur. — Je m'étais promis de ne pas vous parler, aujourd'hui, des courbes dont vous sembliez être passablement saturé. Mais, songez simplement, Ignotus, que le courant de collecteur double chaque fois que la température augmente de 8 °C; en sorte que, quand on passe de 0 à + 40 °C, le courant initial croît trente-deux fois. Par conséquent, une augmentation générale du courant de collecteur, telle que l'entraînc l'échauffement des transistors, déplacera toutes nos courbes de I_c vers le haut. Entre 20 et 40 °C, le courant de collecteur peut facilement doubler. Du coup, le point de fonctionnement (qui est, je vous le rappelle, défini par le croisement de la droite de charge avec une des courbes correspondant à une tension ou intensité donnée de base), au lieu de se trouver au milieu de la droite de charge, se déplacera plus ou moins vers la gauche, entraîné par la montée générale des courbes. Finie notre belle symétrie! Compromise, la parfaite linéarité de l'amplification!...



Ig. — Quel désastre! Vous m'en voyez atterré... mais pas trop. Car je connais votre méthode : vous me plongez dans la plus profonde affliction, pour, ensuite, tel le magicien tirant un lapin de son haut-de-forme, me montrer le remède qui arrange tout. Allons, sortez-moi votre lapin!

Cur. — Vous le connaissez déjà. Car c'est encore la contre-réaction qui va nous tirer d'affaire. Efficace pour combattre la distorsion, elle l'est aussi pour remédier aux lentes fluctuations entraînées par les variations de température.

Ig. — Par conséquent, les montages de contre-réaction que nous avons examinés servent en même temps à compenser les effets de la température?

Cur. — Oui, dans une certaine mesure, et quand ils agissent également en courant continu (ce qui n'est pas le cas dans les figures 60 *b* et 61). Mais, en général, on a besoin, à cette fin, d'une contre-réaction plus énergique.

Ig. — Elle sera alors beaucoup trop forte pour nos signaux à amplifier et réduira à l'excès le gain du montage. Comment sortir de cette situation cornélienne?

Cur. — En adoptant la méthode cartésienne de séparation des difficultés et des fonctions. Laissons de côté les résistances de contre-réaction

corrigeant les signaux à amplifier, et occupons-nous de celles qui compenseront les effets de température. Là encore, on peut utiliser la contre-réaction série...

Encore un « petit détail ».

IG. — Mais je ne vois pas de différence avec le schéma de contre-réaction série par tensions alternatives, à part la présence du condensateur C.

CUR. — C'est justement là ce « petit détail » qui change tout. Car c'est un condensateur de forte capacité (généralement du type électro-

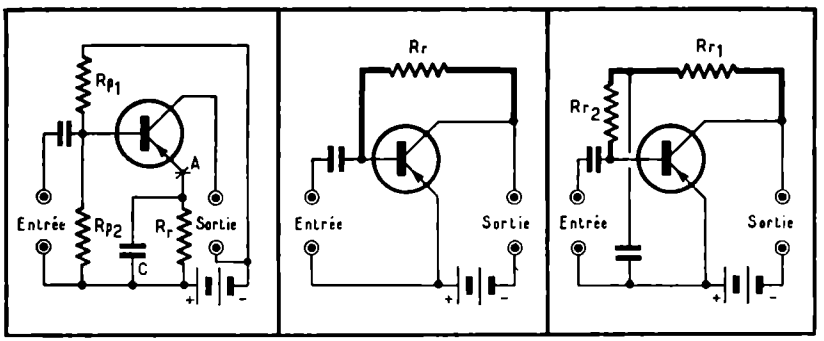
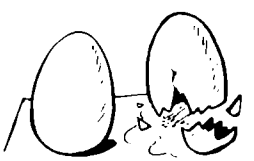


Fig. 62. — Compensation de température par contre-réaction série. La tension de la base est stabilisée par le diviseur de tension R_{p1}-R_{p2}.

Fig. 63. — Compensation de température par contre-réaction parallèle.

Fig. 64. — Ici une partie seulement de la résistance de contre-réaction agit sur la composante alternative.



lytique), offrant aux courants alternatifs une impédance bien inférieure à la résistance R_r. Cette dernière ne sera donc parcourue que par la composante continue du courant et n'exercera que sur celle-ci l'effet de contre-réaction.

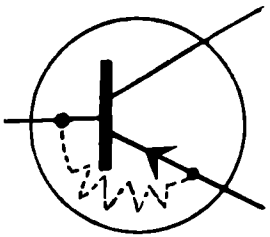
IG. — C'est simple et ingénieux comme l'œuf de Christophe Colomb. Mais, que faire, si, en même temps, nous désirons avoir une contre-réaction en alternatif?

CUR. — Rien ne vous empêche alors d'intercaler, au point A, en série avec R_r, une autre résistance de contre-réaction, mais non découplée, celle-là.

IG. — C'est évident. Peut-on appliquer, là encore, le principe de la contre-réaction parallèle de tension?

CUR. — Bien entendu. Mais, alors, on supprime le condensateur qui servait justement à ne pas laisser passer la composante continue. On applique ainsi à la base une fraction des tensions continues et alternatives du collecteur.

IG. — Mais je ne vois pas l'autre bras du diviseur de tension, servant à cette fin.



CUR. — Et pour cause. Car c'est la résistance base-émetteur du transistor. Maintenant, si vous voulez fignoler, — et vous aurez raison de le faire, — vous pouvez, à l'aide d'un condensateur de découplage C, supprimer la composante alternative d'une partie de la résistance de contre-réaction, en la constituant à l'aide de deux résistances R_{r1} et R_{r2} en série.

IG. — Pour en revenir à mon pauvre oncle, si j'ai bien compris, je pourrai compenser les effets de température, en intercalant des résistances aux points A et B (fig. 61).

CUR. — Assurément, à la condition de découpler la première par un condensateur de forte capacité, pour qu'elle ne renforce pas outre mesure, la contre-réaction... Mais, je ne vous ai pas encore parlé d'une très élégante façon de parer aux inconvénients du comportement thermique des semiconducteurs. Cela consiste à les mettre à contribution pour les combattre.

Utilisation des défauts.

IG. — Est-ce sérieux? S'agit-il de quelque chose dans le genre de l'homéopathie, où l'on guérit le mal par le mal?

CUR. — C'est bien ainsi qu'il faut me comprendre. Puisque l'échauffement augmente l'intensité du courant dans les semiconducteurs, c'est

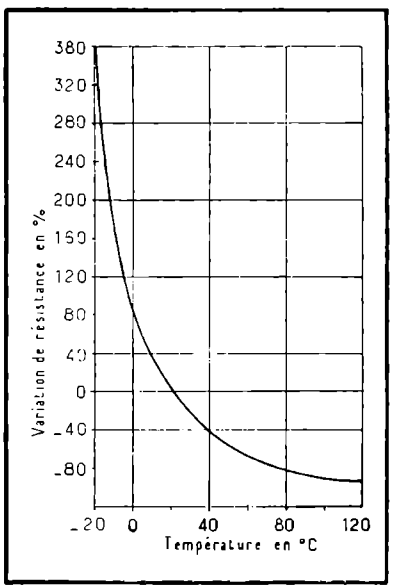


Fig. 65. — Variation (en %) de la résistance d'une thermistance en fonction de la température.

que leur résistance diminue quand leur température monte. On peut donc fabriquer des résistances composées de semiconducteurs, du type P ou N, dont la résistance tombe très vite avec l'augmentation de la température. Voici la courbe d'une de ces résistances, appelées « *thermistances* » ou résistances à coefficient de température négatif (en abrégé : C.T.N.). Vous voyez que, quand la température passe de 20 à 40 °C,

la résistance de la thermistance baisse de quelque 45 %. Et, à 60 °C, elle diminue de plus de moitié.

IG. — Voilà une résistance qui supporte très mal la chaleur. Je me demande comment vous allez l'utiliser pour, justement, neutraliser les dégâts de la chaleur.

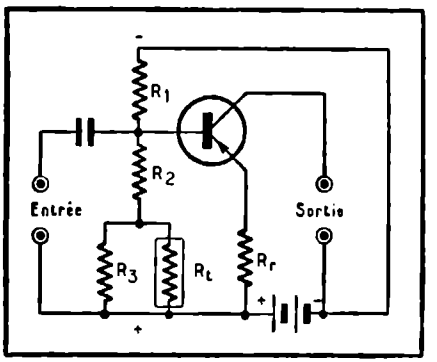
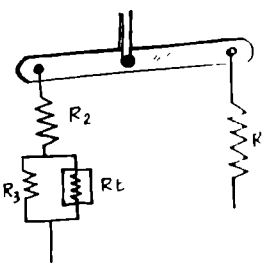


Fig. 66. — Compensation des effets de température à l'aide d'une thermistance R_t commandant le potentiel de la base.

CUR. — Très simplement, en la plaçant dans le diviseur de tension, qui fixe la polarisation de la base. L'un des bras du fléau, qu'est tout diviseur de tension, est la résistance R_1. Quant à l'autre, sa composition est plus complexe : il est constitué par la thermistance R_t, avec, en parallèle, R_3, et, en série avec les deux, R_2. Que se passe-t-il dès lors, quand la température monte?

IG. — La résistance de la thermistance diminue, ce qui fait baisser la résistance de tout le bras, composé de R_2, R_3 et R_t. Comme la résistance de R_1 ne diminue pas (ou, peut-être même, augmente-t-elle légèrement avec la température), le potentiel de la base deviendra moins négatif. Et cela entraînera une diminution du courant de collecteur. Formidable!



CUR. — Vous voyez que l'art suprême, dans la vie, est de muer les défauts des choses (ou des êtres) en qualités. C'est ce que nous avons accompli ici.

IG. — Mais pourquoi avez-vous compliqué le schéma avec ces résistances R_2 et R_3?

CUR. — Pour que la compensation s'effectue avec précision. Il faut que les valeurs de ces résistances soient calculées de façon adéquate. Parfois, on peut omettre l'une ou l'autre, si la caractéristique de la thermistance répond exactement à nos desiderata.

IG. — Je sens que ma propre résistance baisse, car mon cerveau est trop échauffé.

CUR. — Alors, laissons-le au repos.

Au cours de leurs précédentes conversations, Curiosus et Ignotus ont acquis une solide connaissance du comportement des transistors utilisés comme amplificateurs. Ils ont à cette fin analysé le montage le plus couramment utilisé, où les signaux à amplifier sont appliqués entre base et émetteur et recueillis, après amplification, entre collecteur et émetteur. Cela correspond au montage classique des tubes électroniques. Cependant, et au même titre que pour ces derniers, d'autres schémas peuvent être avantageusement employés dans certains cas. Il est utile d'en examiner la structure et le fonctionnement avant de passer à l'étude des montages pratiques que nos amis vont entreprendre dans leurs prochaines causeries.

★ **SOMMAIRE : Montages des tubes avec cathode ou grille ou anode à la masse. - Montage des transistors à émetteur commun, à base commune ou à collecteur commun. - Amplification en courant et en tension des trois montages fondamentaux. - Leurs résistances d'entrée et de sortie. - Tableau synoptique des caractéristiques.**

EC - BC - CC

Le hasard dans l'histoire des inventions.

IGNOTUS. — Comment se fait-il que le transistor ait été inventé plus de quarante ans après le tube électronique? Il est pourtant, à première vue, plus simple d'introduire des impuretés dans un semiconducteur que de pratiquer le vide dans une ampoule de verre, et d'y chauffer une cathode projetant des électrons vers l'anode, à travers une grille.

CURIOSUS. — Dans l'Histoire des inventions, le hasard joue un certain rôle. Et le transistor aurait pu être inventé avant le tube électronique. D'ailleurs, expérimentant des détecteurs à cristaux de zincite, un technicien russe, nommé LOSSEV, réussit, en 1922, à engendrer et à amplifier des oscillations électriques. Son montage (appelé « cristadyne ») est, cependant, resté sans lendemain. Mais, si le transistor avait été inventé avant la lampe, on aurait, sans doute, salué l'apparition du tube à vide comme un grand perfectionnement... Et on aurait appliqué aux triodes électroniques les divers schémas fondamentaux employés pour les triodes à cristal. Ainsi, aurait-on trouvé les montages avec cathode à la masse, grille à la masse et anode à la masse.

IG. — Qu'est-ce que ces promenades de la masse?

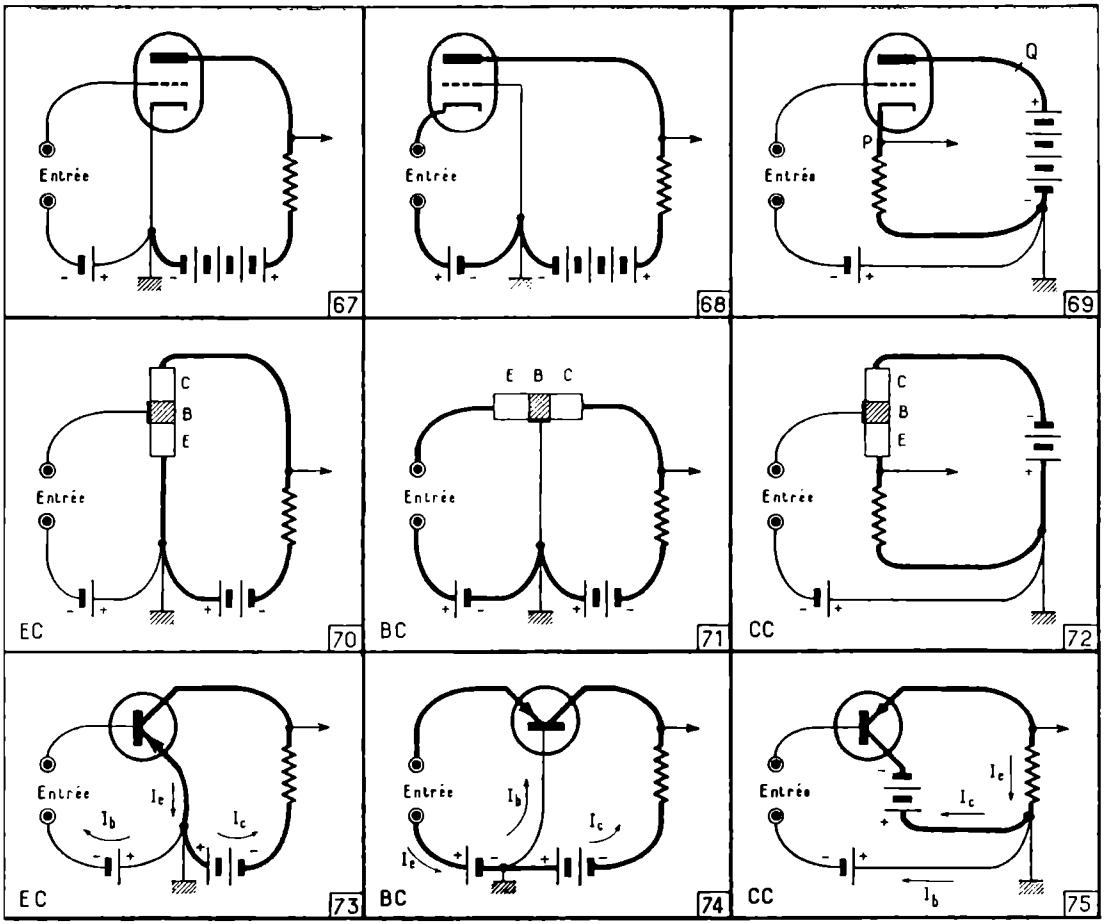
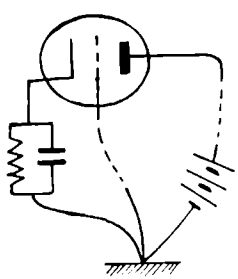


Fig. 67. — Montage avec cathode à la masse, le plus « classique » de tous.
Fig. 68. — Montage avec grille à la mosse.
Fig. 69. — Montage avec anode à la masse ou « cathodyne ».
Fig. 70. — Montage à émetteur commun, le plus employé de tous.
Fig. 71. — Montage à base commune, le plus ancien de tous.
Fig. 72. — Montage à collecteur commun, le plus ancien de tous.
Fig. 73-74-75. — Les trois montages fondamentaux à transistors représentés de manière à bien montrer comment, au point commun, le courant de l'émetteur I_e se divise en deux : le courant de base I_b et le courant de collecteur I_c.



Les trois montages fondamentaux pour tubes.

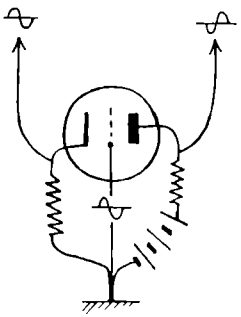
Cur. — Vous savez, Ignotus, que, par « masse », nous entendons le point à potentiel fixe. C'est, dans un schéma à lampe, le point où convergent les circuits de grille et d'anode.

Ig. — Il me semble que c'est toujours vers la cathode qu'aboutissent les retours de ces deux circuits.

CUR. — C'est le cas du montage le plus répandu, qu'on désigne sous le nom de « cathode à la masse » (même si, entre la cathode et la masse, se trouve une résistance de polarisation, puisque celle-ci, pour les tensions alternatives, est pratiquement court-circuitée par un condensateur). Avez-vous, cependant, oublié le montage avec grille à la masse?

IG. — En effet, nous l'avons rencontré lorsque nous étudiions la modulation de fréquence. Utilisé pour l'amplification de signaux de fréquences élevées, il permet de mieux séparer le circuit d'entrée de celui de sortie, la grille jouant le rôle d'écran de protection. Et c'est la cathode qui sert, ici, d'électrode de commande.

CUR. — Reste encore une troisième possibilité : fixer le potentiel de l'anode, en la reliant à la masse (à travers la source de haute tension, bien entendu), appliquer le signal d'entrée entre la grille et la masse, et recueillir la tension amplifiée, sur une résistance de charge intercalée entre la cathode et la masse.



IG. — Drôle de montage. Certes, ici encore, la résistance de charge est parcourue par le courant anodique, de sorte qu'on y retrouve bien la tension amplifiée.

CUR. — J'ai eu tort d'employer ce dernier terme. En fait, le gain de notre montage, appelé *cathodyne*, est inférieur à l'unité. Car la résistance de charge exerce un effet de contre-réaction, tel que, en fait d'amplification, c'est plutôt un affaiblissement que l'on a.

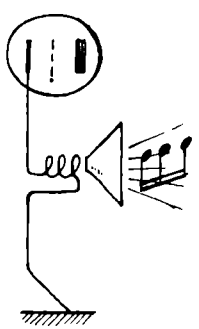
IG. — C'est donc un montage sans aucun intérêt?

CUR. — Bien au contraire. Notez, tout d'abord, Ignotus, que les tensions apparaissant sur la résistance de charge, au point P, sont en phase avec celles appliquées à la grille.

IG. — C'est même pour cette raison que l'on a cette violente contre-réaction.

CUR. — Bien entendu. Mais, si vous intercalez une seconde résistance de charge au point Q, c'est-à-dire selon le mode classique du montage avec cathode à la masse...

IG. — ... j'aurais, dans ce point, des tensions en opposition de phase avec celles de l'entrée. Ainsi donc, le même tube permet d'obtenir, à la sortie, des tensions en phase et en opposition de phase! Quel montage pratique pour attaquer deux tubes en push-pull!



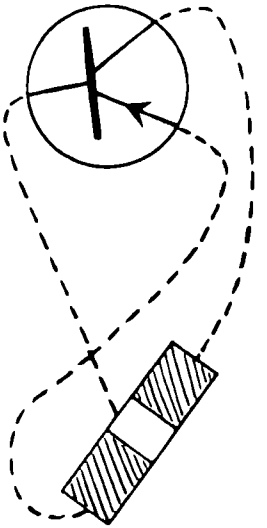
CUR. — C'est un des emplois du cathodyne. Mais, il est également utilisé dans les cas où l'on a besoin d'une résistance de sortie faible. Car, vous vous en doutez, la résistance de charge, placée dans la cathode, doit avoir une valeur bien inférieure à celles que l'on emploie dans le circuit anodique. On peut même, de la sorte, faire débiter une lampe de sortie, directement sur la bobine mobile du haut-parleur, sans passer par l'intermédiaire d'un transformateur adaptateur d'impédance, éliminant ainsi une source de distorsions non négligeable.

IG. — Vous me voyez positivement conquis par votre cathodyne. Mais, je vous connais et vous vois venir avec vos gros sabots, Curiosus. Si vous me parlez avec tant de chaleur de ces trois montages fondamentaux à tubes, c'est sans doute pour analyser des schémas équivalents à transistors.

Version transistors.

CUR. — On ne peut rien vous cacher. Effectivement, à chacun de ces trois montages correspond un mode particulier d'utilisation des tran-

sistors. Pour plus de clarté, je vous trace les schémas correspondants de deux façons. D'une part, je représente le transistor par un bâtonnet, comme nous le faisions au début; on voit ainsi mieux le cheminement du courant entre les trois régions du transistor, et je regrette, parfois, qu'on n'ait pas adopté ce symbole universellement. D'autre part, je dessine les mêmes schémas avec le symbole habituel. Mais, là encore, plutôt que de soigner la présentation du schéma, en traçant des droites horizontales et verticales, je me suis efforcé de mettre bien en évidence les circuits de base et de collecteur. Et — pour plus de clarté — j'ai fait ressortir, en *gros traits*, les circuits *anodiques* des tubes et les circuits de *collecteur* des transistors.



IG. — Vos dessins, en effet, ne ressemblent guère à tout ce que j'ai vu ailleurs. Mais, du moins, paraissent-ils simples. Je vois qu'il y a, là encore, trois possibilités : émetteur à la masse, base à la masse ou collecteur à la masse.

CUR. — En effet. Mais la présence de la masse étant facultative, on appelle ces trois schémas : *montage à émetteur commun, montage à base commune* et *montage à collecteur commun*.

IG. — Le fait est que, dans chacun de ces montages, c'est une de ces trois zones du transistor qui est commune aux circuits d'entrée et de sortie... Et, je suis, en somme, comme M. JOURDAIN, ce bourgeois gentilhomme, qui ignorait qu'il parlait en prose, puisque, tout en examinant, avec vous, le montage à émetteur commun, je ne savais pas qu'on l'appelait ainsi.

CUR. — Nous nous sommes, en effet, longuement penchés sur ce montage, parce que c'est, de loin, le plus employé.

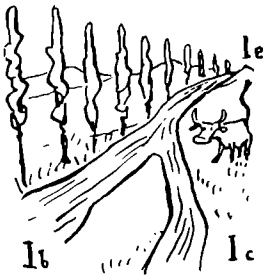
IG. — Au même titre que, pour les tubes, le classique schéma à cathode commune.

CUR. — Bien entendu. Vous savez que, correctement employé, ce montage peut procurer un excellent gain, tant en courant qu'en tension, et, par conséquent, aussi en puissance. Je vous rappelle que la tension de sortie, dans ce montage à émetteur commun (ou E.C.), est en opposition de phase par rapport à celle d'entrée, et que la résistance d'entrée est de quelques centaines d'ohms, alors que la résistance de sortie est de quelques dizaines de kiloohms.

Est-ce un amplificateur?

IG. — Tout cela est bien gravé dans ma mémoire. Puis-je m'aventurer dans le domaine de l'inconnu, en essayant d'analyser le montage à base commune (ou, sans doute, B.C. en abrégé)? Là, les tensions d'entrée sont encore appliquées entre émetteur et base. Mais, cette fois, c'est l'émetteur qui joue le rôle d'électrode de commande, la base restant passive. Si le signal, à l'entrée, rend l'émetteur plus positif, le courant de base augmente, celui du collecteur aussi; dès lors, la chute de tension sur la résistance de charge augmente à son tour, et le potentiel de sortie devient plus positif. Pas de doute : la tension de sortie est, ici, en phase avec celle d'entrée.

CUR. — Votre analyse de la situation est tout à fait correcte, mais incomplète. Car vous n'avez pas examiné quelle est, ici, l'amplification du courant.



IG. — Là, il y a quelque chose qui me trouble. Dans le circuit d'entrée, j'ai le courant de l'émetteur I_e, alors que, dans le circuit de sortie, je n'ai que le courant de collecteur I_c, qui est légèrement plus faible, car le courant de l'émetteur se divise (le dessin le montre bien) en deux courants : celui de base I_b et celui de collecteur I_c. Et, ce qui est vrai pour les courants, l'est aussi pour leurs faibles variations. Par conséquent, l'amplification du courant, c'est-à-dire le rapport d'une faible variation du courant de sortie ΔI_c à une faible variation du courant d'entrée ΔI_e, sera inférieure à l'unité, puisque I_e est plus grand que I_c. En fait de gain, c'est plutôt une atténuation (1).

CUR. — Oui. On le désigne par la lettre α, alors que, pour le montage à émetteur commun, l'amplification de courant est symbolisée par la lettre β.

IG. — Ce n'est pas logique de donner la première lettre de l'alphabet grec à un montage qui est moins employé.

CUR. — A cela, il y a une raison historique. A l'aube des transistors, on ne connaissait que le modèle à pointes. Et, seul le montage à base commune permettait de l'utiliser de façon stable. C'est donc le premier en date, et, pour cette raison, les fabricants indiquent souvent les caractéristiques pour ce genre — pourtant périmé — d'emploi des triodes à cristal.

IG. — En somme, abstraction faite du pieux respect dû aux choses d'antan, le montage à base commune n'offre aucun intérêt, puisque, au lieu d'amplifier, il atténue.

Mieux qu'une curiosité historique.

CUR. — Voilà le danger des conclusions aussi hâtives que définitives, caractérisant la nouvelle génération!... Le montage B.C. est, dans bien des cas, fort intéressant. Il permet d'atteindre des fréquences plus élevées que les autres montages. Et, par ailleurs, il est capable d'assurer une excellente amplification.

---

(1) On peut aisément exprimer ce « gain » que l'on désigne par α en notant que :

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c + \Delta I_b}$$

puisque $\Delta I_e = \Delta I_c + \Delta I_b$.

En divisant le nominateur et le dénominateur par ΔI_b, on a :

$$\alpha = \frac{\Delta I_c / \Delta I_b}{\Delta I_c / \Delta I_b + 1}$$

On voit que α est inférieur à l'unité. D'autre part $\Delta I_c / \Delta I_b$ est, on s'en souvient, l'amplification de courant dans le montage à émetteur commun, que nous désignons par β.

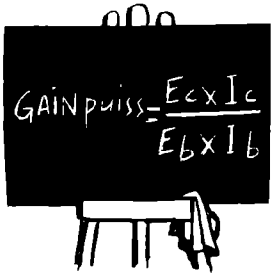
Par conséquent :

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Pour les transistors ayant un coefficient β de valeur élevée, α se rapproche sensiblement de l'unité; autrement dit le courant à la sortie subit sensiblement les mêmes variations qu'à l'entrée.

IG. — Etes-vous en train de vous moquer de moi? Vous appelez amplification un gain inférieur à un?...

CUR. — Il s'agit là du gain en intensité. Mais, ce qui peut vous intéresser davantage, selon le cas, c'est le gain en tension et surtout en puissance. Or, de ce côté, la situation est plus satisfaisante. Pour que vous vous en rendiez compte vous-même, il faut vous dire que la résistance d'entrée du montage B.C. est très faible; selon le modèle, elle varie de 30 à 500 Ω.



IG. — Rien d'étonnant, puisque c'est le rapport d'une faible variation de la tension à l'entrée, à la variation du courant qu'elle provoque.

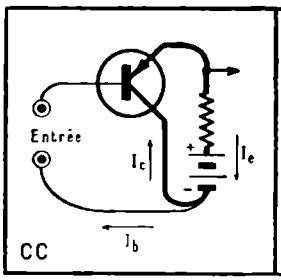


Fig. 76. — Variante possible du montage à collecteur commun, ne différant de celui de la figure 75 que par position de la source de tension du collecteur.

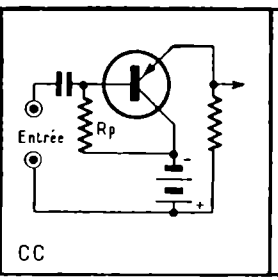


Fig. 77. — Mode de polarisation du montage de la figure 75.

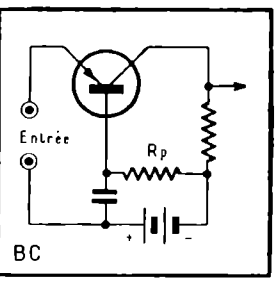


Fig. 78. — Mode de polarisation du montage de la figure 74.

Or, ici, c'est le courant de l'émetteur qui est en jeu. Et il varie très fort. Donc, le rapport a une valeur très basse.

CUR. — Bien raisonné. En revanche, la résistance de sortie peut atteindre des valeurs très élevées, de l'ordre du mégohm.

IG. — Mazette! Je comprends alors qu'une variation de courant de sortie, sensiblement la même que celle du courant d'entrée, doit, sur cette résistance de sortie élevée, faire apparaître des tensions autrement fortes que celles qui prennent naissance à l'entrée. Nous devons donc, effectivement, avoir un gain élevé en tension.

CUR. — Oui. Il peut être de plusieurs milliers de fois. Et, de ce fait, on peut aussi obtenir un bon gain de puissance. Malheureusement, on ne peut pas en profiter convenablement.

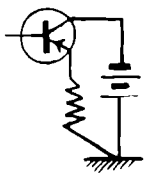
IG. — Vous me faites subir une véritable douche écossaise, Curiosus. La B.C., à peine réhabilitée dans mon opinion, vous vous mettez à la dénigrer. Pourquoi?

CUR. — Parce que notre étage B.C. risque d'être suivi d'autres étages, dont l'impédance d'entrée, beaucoup plus faible que celle de sortie de la B.C., nous fera perdre le bénéfice du gain procuré grâce à cette résistance de sortie élevée.

Le troisième montage.

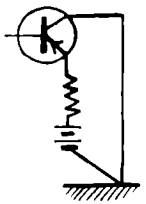
IG. — Cette fois-ci, c'est fini! Je ne veux plus entendre parler de ce sacré montage à base commune. Et, j'espère que le montage à collecteur

commun (sans doute, désigné par les initiales C.C.) sera moins décevant.



CUR. — Avant d'en entreprendre l'analyse, je vous ferai remarquer qu'il en existe deux variantes, selon que la batterie de tension de collecteur est placée entre masse et collecteur ou entre résistance de charge et masse. Cela revient au même. Mais, dans la deuxième variante, la base est automatiquement polarisée par rapport à l'émetteur.

IG. — Mais, alors, dans la première variante, il faut une pile spéciale pour la polarisation?



CUR. — Nullement. Une simple résistance de polarisation R_p, placée entre la base et le négatif de la pile, fait parfaitement l'affaire, comme c'était le cas dans le montage E.C. Par la même occasion, je vous donne le montage pratique de polarisation dans le cas de B.C.

IG. — J'aime mieux cela que les deux batteries qui figurent dans vos schémas théoriques, pour la plus grande joie des fabricants des piles... Mais, revenons-en à notre montage C.C. Là encore, il n'y a pas, je le vois, d'inversion de phase à la sortie. En effet, un potentiel plus négatif sur la base accroît l'intensité du courant de l'émetteur, qui détermine une chute de tension plus forte, rendant l'émetteur moins positif, donc plus négatif.

CUR. — Eh oui, Ignotus. Seul de nos trois montages, E.C. est capable d'inverser la phase des signaux. Voyons maintenant où en est l'amplification de courant.

IG. — Ici, à l'entrée, nous avons le courant de base, qui est toujours très faible. Par contre, à la sortie, nous avons le plus fort de nos courants, celui d'émetteur. Par conséquent, nous devons avoir ici une amplification de courant encore plus forte que dans le montage E.C. Verriez-vous une inconvénient à ce que, continuant à puiser dans l'alphabet grec, je l'appelle γ (1)?

CUR. — Je ne pense pas que les Héllènes s'y opposent. Et vous voilà ravi de connaître ce montage qui amplifie si bien. Dois-je verser de l'eau froide sur votre enthousiasme juvénile?

IG. — Je sens que vous allez me porter un coup cruel en m'annonçant qu'ici, les résistances internes sont, à l'opposé de ce qui se passe dans le montage B.C., telles que notre belle amplification de courant ne nous sert à rien.

CUR. — Je ne vous cache pas que c'est la triste vérité. Ici, comme dans le montage cathodyne, dont c'est la réplique en transistors, la résistance d'entrée peut atteindre 1 MΩ, alors que celle de sortie est très faible : entre 50 et 500 Ω.

IG. — Tout le contraire de B.C.! En sorte que nous ne gagnons rien en tension ni en puissance?

CUR. — Rien ou presque rien, Ignotus. Vous auriez pu, d'ailleurs, vous en rendre compte, en remarquant que la résistance de charge intro-

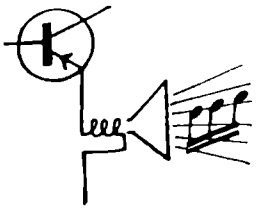
(1) L'amplification de courant en CC est :

$$\gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_e + \Delta I_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} + \frac{\Delta I_b}{\Delta I_b} = \beta + 1$$

On voit que dans CC le gain de courant est légèrement plus élevé que dans le montage EC. Entre les expressions de gain de ces trois montages fondamentaux, on peut établir une relation très simple :

$$\alpha \times \gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \times \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

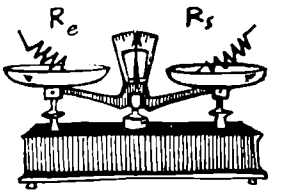
duit ici une très forte contre-réaction. Quand une alternance du signal tend à rendre la base plus négative par rapport à l'émetteur, en augmentant le courant de celui-ci, cet accroissement de courant rend l'émetteur plus négatif, ce qui s'oppose à l'action du signal à l'entrée.



IG. — A quoi sert donc ce montage, incapable de nous procurer un gain, tant soit peu intéressant, de tension ou de puissance?

CUR. — On l'emploie dans certains cas, lorsqu'on a besoin d'un courant intense pour attaquer un transistor de puissance ou encore lorsqu'une faible résistance de sortie permet d'assurer une meilleure adaptation d'impédances, comme, par exemple, l'attaque directe de la bobine mobile d'un haut-parleur.

IG. — Je constate qu'une fois de plus, la vieille maxime « in medio stat virtus » se vérifie. Dans les transistors, ce juste milieu est incontestablement le montage à émetteur commun, où les résistances d'entrée et de sortie ont de bonnes valeurs moyennes, ce qui permet d'avoir des gains convenables, tant en intensité qu'en tension et en puissance.



CUR. — Vous avez raison, Ignotus. Les valeurs des résistances d'entrée et de sortie sont comme deux plateaux d'une balance. Sensiblement au même niveau en E.C., le plateau R_e baisse beaucoup en B.C., et monte en C.C. par rapport au plateau R_s. Et, si vous me promettez de ne le dire à personne, je vais vous confier un secret : pour un transistor donné, le produit $R_e \times R_s$ de la résistance d'entrée, par la résistance de sortie, reste le même pour les trois montages fondamentaux.

IG. — Ainsi, par exemple, si en E.C., on a $R_e = 500\ \Omega$ et $R_s = 20\ 000\ \Omega$, le produit est 10 000 000. Le même transistor, monté en B.C., aura, disons, $R_e = 50\ \Omega$; dans ce cas, pour que le produit demeure constant, il faut que $R_s = 200\ 000\ \Omega$. Et, si en C.C., c'est R_e qui est de 200 000 Ω, R_s doit avoir 50 Ω... Si vous permettez, je vais résumer, en un tableau, les principales caractéristiques de nos trois montages, de manière à pouvoir mieux les comparer.

CUR. — Excellente idée qui nous permet de mettre agréablement le point final à notre très utile causerie d'aujourd'hui (1).

---

(1) Dans la précédente note nous avons établi une relation très simple entre les coefficients d'amplification de courant dans les trois montages fondamentaux :

$$\beta = \alpha \times \gamma \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{\beta}{\gamma}$$

Le tableau ci-après permet d'exprimer chacun de ces coefficients en fonction de chacun des deux autres.

MONTAGE	EC	BC	CC
EC	β	$\beta = \dfrac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\beta = \gamma - 1$
BC	$\alpha = \dfrac{\beta}{1 + \beta}$	α	$\alpha = \dfrac{\gamma - 1}{\gamma}$
CC	$\gamma = 1 + \beta$	$\gamma = \dfrac{1}{1 - \alpha}$	γ

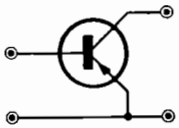
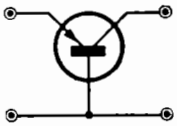
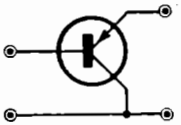
MONTAGE	EMETTEUR COMMUN	BASE COMMUNE	COLLECTEUR COMMUN
SCHEMA			
Résistance d'entrée r_e.	$\Delta E_b/\Delta I_b$ 200 à 2 000 Ω	$\Delta E_e/\Delta I_e$ 30 à 1 500 Ω	$\Delta E_b/\Delta I_b$ 0,2 à 1 MΩ
Résistance de sortie r_s.	$\Delta E_c/\Delta I_c$ 10 à 100 kΩ	$\Delta E_c/\Delta I_c$ 0,5 à 2 MΩ	$\Delta E_e/\Delta I_e$ 50 à 500 Ω
Amplification de courant.	$\beta = \Delta I_c/\Delta I_b$ De 20 à 80	$\alpha = \Delta I_c/\Delta I_e$ moins de 1	$\gamma = \Delta I_e/\Delta I_b$ De 20 à 80
Amplification de tension.	plusieurs centaines	plusieurs centaines ou milliers	1 environ
Amplification de puissance.	plusieurs milliers	plusieurs centoines	plusieurs dizaines
Phase de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.	Opposition	En phase	En phase
UTILISATION.	Universelle. Amplificateur et déphaseur	En très H.F. Pour attaquer une impédance élevée.	Pour attaquer une impédance faible

Fig. 79. — Tableau résumant les principales caractéristiques des trois montages fondamentaux des transistors.

Autant (et peut-être plus) que dans le domaine des tubes, le problème de l'adaptation des impédances joue un rôle primordial dans la conception des montages à transistors.

Cependant, Ignotus a quelque peine à bien comprendre ce problème en raison de l'insuffisance de ses notions de base en électricité. Aussi Curiosus se voit-il obligé d'y remédier en exposant à son ami ces notions élémentaires que, tout compte fait, bien des techniciens semblent ne pas avoir entièrement assimilées... (Bien entendu, le lecteur qui sait ce qu'adaptation d'impédances veut dire se dispensera de lire les propos épistolaires de nos amis.)

★ **SOMMAIRE : La source et l'utilisation. - Force électromotrice et résistance interne. - Tension aux bornes. - Commande par tension. - Commande par courant. - Conditions optima du transfert de puissance. - Adaptation des impédances. - Emploi du transformateur. - Rapport de transformation optimum.**

QUESTIONS D'ADAPTATION

IGNOTUS ÉCRIT A CURIOSUS

Mon cher Curiosus,

Si cette stupide grippe me prive du plaisir de vous rencontrer, elle ne m'empêche pas de réfléchir à tout ce que vous m'avez expliqué lors de notre dernière causerie.

J'ai ainsi constaté que vous attachiez une grande importance à la question des résistances d'entrée et de sortie. Leurs valeurs changent selon le montage adopté. Et vous avez, à plusieurs reprises, insisté sur la question d'adaptation (?) des résistances.

J'avoue ne pas avoir très bien compris cette partie de votre exposé. Et je me suis fait l'effet d'un semiconducteur du type P : j'ai des lacunes!

Pourriez-vous les combler? Je vous en remercie d'avance.

Votre ami IGNOTUS.

CURIOSUS RÉPOND A IGNOTUS

« Mon pauvre Ignotus,

Toutes les calamités à la fois! La grippe et les lacunes...

Votre médecin se chargera de la première. Je m'efforcerai de faire disparaître les secondes.

Oui, le problème de l'adaptation des résistances (ou, plus généralement, des impédances) est très important, et je tiens à ce que vous l'assimiliez bien.

Dans tous les montages que nous devons examiner, il s'agit d'acheminer l'énergie

électrique d'un organe à un autre, avec le minimum de pertes, de gaspillage. Autrement dit, avec le maximum d'efficacité.

Il y a donc toujours un organe de départ et un organe d'arrivée. Le premier est, aux yeux du second, la *source* d'énergie. Et, dans l'esprit de cette source, le deuxième organe, auquel elle livre son énergie, est l'*utilisation*. En somme, fournisseur et client.

Excusez-moi, Ignotus, de proférer ainsi des vérités premières, en leur conférant une allure philosophique. En fait, vous avez toujours affaire à ces sources et à ces organes d'utilisation. La pile de lampe de poche est une source, et le filament de l'ampoule qu'elle alimente est l'utilisation. Les alternateurs d'une centrale sont la source, et tous les moteurs, tous les appareils d'éclairage et de chauffage branchés sur le réseau de distribution sont l'utilisation.

Mais, aussi, le circuit d'antenne d'un récepteur est une source, et le circuit d'entrée du tube préamplificateur H.F., qu'il attaque, en est l'utilisation. De même, le tube de puissance est la source, et le haut-parleur, l'utilisation.

Dans le cas des montages à transistors, la sortie de chaque transistor constitue également la source pour l'entrée de l'étage suivant, qui en est l'utilisation.

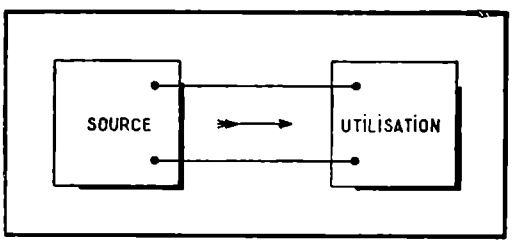


Fig. 80. — Voilà comment, sous la forme la plus générale, se présente le problème du transfert d'énergie de la source vers l'utilisation.

Mais, à quoi bon multiplier les exemples? En revanche, ce qu'il faut bien comprendre, c'est qu'une source est caractérisée par deux grandeurs :

1) *Sa force électromotrice.* C'est la tension maximum qu'elle est capable de faire apparaître à ses bornes; c'est, si vous voulez, sa vitalité...

2) *Sa résistance interne.* Car toute source oppose, au passage du courant qui la parcourt elle-même, une certaine résistance et, plus généralement, une certaine *impédance de la source.*

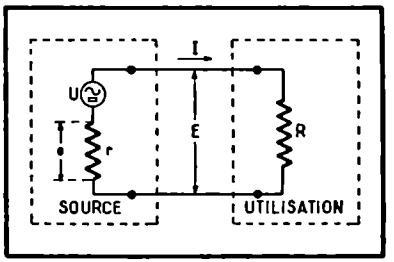


Fig. 81. — La force électromotrice U continue ou alternative de la source crée un courant I à travers sa résistance interne r (sur laquelle se produit une chute de tension e) et la résistance d'utilisation R (sur laquelle apparaît la tension E).

Dans cette résistance interne r, le courant débité par la source détermine, bien entendu, une chute de tension, qui va au détriment de la tension E, apparaissant aux bornes de la source, et qui est appliquée à la résistance d'utilisation R. Ainsi, la tension E demeure-t-elle inférieure à la force électromotrice U, et cela d'autant plus que le courant I est plus fort. Evidemment, s'il n'y a aucun courant, on trouve, aux bornes de la source, une tension égale à sa force électromotrice. On dit alors que la source est à *circuit ouvert* ou que l'utilisation a une résistance infinie.

Au risque de faire monter votre fièvre, je vous propose d'examiner ce très élémentaire calcul. La résistance totale du circuit est $r + R$. Par conséquent, selon la loi d'Ohm, l'intensité du courant est :

$$I = \frac{U}{r + R}$$

Dans la résistance interne r, ce courant détermine une chute de tension :

$$e = \frac{Ur}{r + R}$$

Et, dans la résistance d'utilisation R, la chute de tension est :

$$E = \frac{UR}{r + R}$$

Si vous avez la force de tenir un crayon, additionnez donc ces deux tensions, et vous trouverez que :

$$e + E = U$$

ce à quoi il fallait s'attendre. Vous voyez que la force électromotrice se répartit en deux tensions : *e*, qui est la chute de tension interne, et E, qui est la tension appliquée à l'utilisation, c'est-à-dire celle qui apparaît aux bornes de la source. Cette répartition s'effectue proportionnellement aux valeurs des résistances de la source et de l'utilisation.

Si la résistance interne de la source est très faible, en comparaison de celle de l'utilisation, la chute de tension, qui se produit à l'intérieur, est, elle aussi, très faible. Et la tension aux bornes E demeure presque aussi grande que la force électromotrice U. Dans ces conditions, une force électromotrice variable se manifeste sur la résistance d'utilisation par une tension variable, et nous sommes en présence d'une *commande par tension.*

Prenez, maintenant, le cas opposé : la résistance interne *r* de la source est beaucoup plus forte que celle de l'utilisation. La chute de tension, qui se produit à l'intérieur de la source, est alors considérable. Et, la tension E, restant disponible à ses bornes, et qui est appliquée à la résistance d'utilisation, est beaucoup plus faible que la force électromotrice U. Ce qui compte alors, c'est le fait que l'intensité I du courant varie proportionnellement à U. Et on considère que, dans ce cas, on a une *commande par courant.*

Avec les transistors, on peut se trouver en présence de ces deux cas extrêmes. Mais, en général, là encore il faut préférer le juste milieu.

Dans les liaisons entre tubes, nous cherchons à appliquer, à l'entrée de chaque étage, le maximum de tension. Et là, le Bon Dieu arrange fort bien les choses. Car l'entrée grille-cathode d'un tube présente généralement une impédance infinie. Ainsi, toute la force électromotrice s'y trouve-t-elle appliquée. C'est le cas-type de commande par tension.

Mais, mon cher Ignotus, avec les transistors, les choses changent d'aspect : ce n'est plus une simple tension, mais *une puissance* qu'il faut fournir au circuit d'entrée, puisque, quel que soit le montage, un courant y apparaît. Vulgairement parlant, les tubes se contentent de volts. Mais les transistors, à qui on applique des volts, absorbent en même temps des ampères. Or, volts par ampères, ça fait des watts.

Et le problème du transfert de puissance n'est pas si simple. Jugez-en vous-même.

Nous cherchons à fournir à l'organe d'utilisation le maximum de puissance, c'est-à-dire la plus grande intensité, sous la tension la plus élevée.

Voulez-vous que nous étudiions quelle doit être la résistance d'utilisation donnant le meilleur résultat?

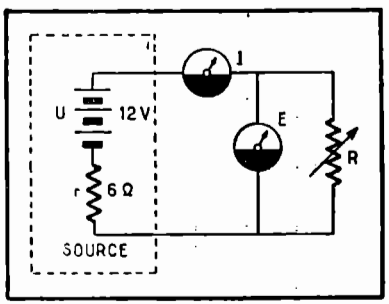


Fig. 82. — Montage expérimental ayant permis de relever les courbes de la figure 83. La résistance interne r de la source est représentée séparément du symbole de la batterie; en réalité, elle est à l'intérieur de la batterie. Pour ne pas introduire de perturbations dans les courants et tensions, il faut utiliser un ampèremètre I de très faible résistance et un voltmètre E de résistance très élevée.

Si elle est faible par rapport à celle de la source, l'intensité du courant sera plus grande. Tant mieux! Mais, la tension sur cette résistance d'utilisation sera plus faible, en raison de la chute de tension élevée à l'intérieur de la source. Tant pis!

Faisons donc le contraire. Prenons une résistance d'utilisation beaucoup plus forte que celle de la source. Alors (comme dans le cas des lampes), nous aurons presque toute la force électromotrice sur l'utilisation. Tant

mieux! Mais l'intensité du courant sera faible. Tant pis!...

Vous devinez, Ignotus, que, là encore, la solution est notre « juste milieu » : résistance d'utilisation ni plus grande que celle de la source ni moins grande non plus. Autrement dit, *le transfert de l'énergie s'opère dans les meilleures conditions, quand la résistance de l'utilisation est égale à celle de la source.* Lorsque cette condition est réalisée, on dit que les résistances (ou, plus généralement, les impédances) sont adaptées.

Pour vous en mieux convaincre, je me suis donné la peine d'établir les graphiques de variation de la puissance transmise P, de l'intensité de courant I et de la tension aux bornes E, pour une source de force électromotrice U = 12 volts, ayant une résistance interne r de 6 Ω, en fonction des variations de la résistance d'utilisation R. Vous constatez qu'au fur et à mesure que R augmente, I diminue et E croît. Leur produit P atteint rapidement le maximum pour $R = r = 6\ \Omega$, puis décroît lentement. N'est-ce pas convaincant?

Ne croyez pas, cependant, que les considérations de transfert optimum d'énergie imposent toujours l'adaptation parfaite des impédances. D'autres exigences, comme celles de bonne linéarité, peuvent conduire à un choix de valeurs s'écartant de celles d'adaptation parfaite.

Mais, je sens une question poindre dans votre esprit : comment faire collaborer deux organes, dont les impédances sont très différentes, sans gaspiller trop d'énergie?

En effet, comment attaquer un transistor à résistance d'entrée faible par un autre à résistance de sortie élevée? Comment transférer la puissance d'un tube de forte résistance interne dans la bobine mobile d'un haut-parleur? Comment, avec un pick-up électrodynamique de faible impédance, attaquer un tube amplificateur, dont la résistance d'entrée est infinie?...

Vous devinez la réponse : c'est notre vieille connaissance, le transformateur, qui servira d'*adaptateur d'impédance*. Et, bien entendu, on joue, à cette fin, sur le rapport entre le primaire et le secondaire.

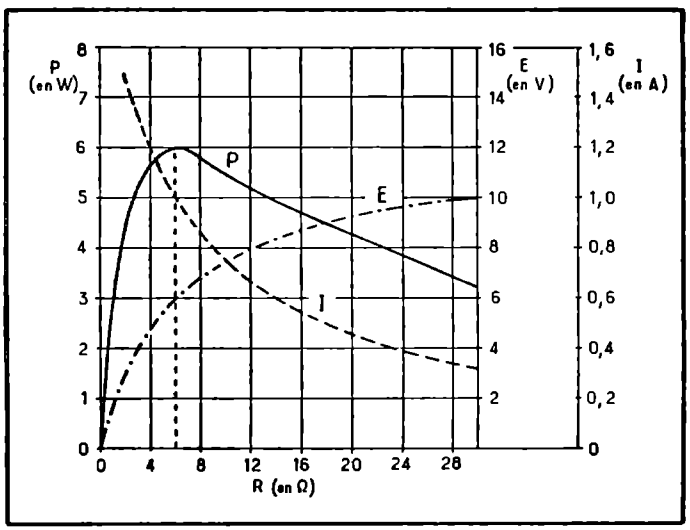


Fig. 83. — Courbe de puissance P transmise à la résistance R, de tension E appliquée à ses bornes et du courant I qui la traverse, en fonction de la valeur de cette résistance R. Attention : les échelles de P, de E et de I sont différentes.

Il faut, évidemment, que l'impédance du primaire soit adaptée, donc égale à celle de la source. Et l'impédance du secondaire doit être égale à celle de l'utilisation. En fait, il suffit qu'elles leur soient proportionnelles.

Or, vous le savez, l'impédance d'un enroulement est égale à sa self-induction multipliée par $2\pi f = \omega$. Donc, si l'on désigne la self-induction du primaire et du secondaire par L_1 et L_2, nous devons avoir :

$$\frac{r}{R} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}$$

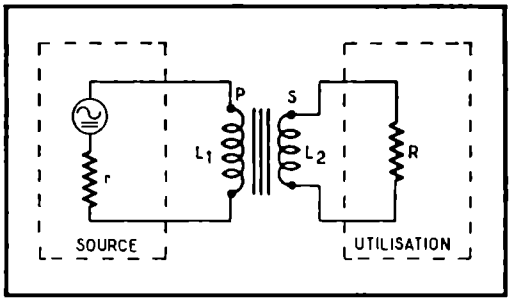


Fig. 84. — Pour adapter les impédances de source et d'utilisation différentes, on utilise un tranformateur de rapport approprié.

Je vous rappelle maintenant que la self-induction est, pour sa part, proportionnelle au carré du nombre de spires. Si nous désignons par N_1 et N_2 les nombres des spires du primaire et du secondaire, nous pouvons écrire :

$$\frac{r}{R} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

Mais, Ignotus, qu'est-ce que ce N_1/N_2? Rappelez-vous que ce rapport des nombres de spires est appelé *rapport de transformation* n. On peut donc dire que :

$$\frac{r}{R} = n^2 \text{ ou encore } n = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

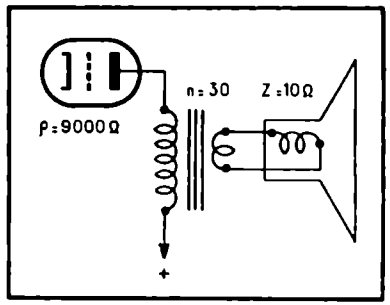


Fig. 85. — Le transformateur abaisseur permet d'adapter la faible impédance de la bobine mobile du haut-parleur à la résistance interne élevée du tube de sortie.

Ce résultat est très important. Prenez un tube de puissance, dont la résistance interne $\rho = 9\,000\ \Omega$. S'il doit débiter sur un haut-parleur dont la bobine mobile a une impédance de 10 Ω, il faut placer, entre les deux, un transformateur de rapport :

$$n = \sqrt{\frac{9\,000}{10}} = \sqrt{900} = 30.$$

Mais, je m'arrête là. Car je ne veux pas contrarier la bienfaisante action de l'aspirine.

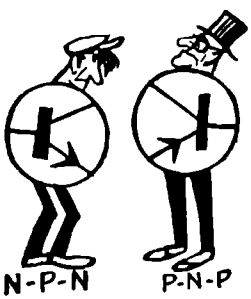
Meilleure santé!

Votre ami CURIOSUS ».

Au cours de leurs précédentes causeries, Curiosus et Ignotus ont étudié le comportement individuel du transistor. Maintenant, ils vont examiner sa vie en société. Les relations entre divers transistors coopérant dans un appareil sont assurées par des circuits de liaison. Ceux-ci doivent transmettre, à chaque transistor suivant, l'énergie recueillie à la sortie de celui qui le précède. On verra que, en plus des circuits de liaison classiques de la technique des tubes, on peut employer ici nombre de combinaisons ingénieuses propres au transistor et qui, après l'avoir surpris, forceront l'enthousiasme d'Ignotus...

★ **SOMMAIRE : Les montages fondamentaux avec des transistors N-P-N. - Avantages et inconvénients de la liaison par transformateur. - Réglage d'intensité sonore. - Liaison par résistance et capacité. - Valeur du condensateur de liaison. - Montage à liaison directe. - Amplificateur à courant continu. - Montages à symétrie complémentaire. - Transistors en tandem.**

LIAISONS EN TOUS GENRES



IGNOTUS. — Ces derniers temps, Curiosus, vous ne m'avez parlé que des transistors P-N-P, en traitant les N-P-N en parents pauvres.

CURIOSUS. — Il y a à cela deux raisons. La première est que le modèle P-N-P est, de loin, le plus répandu. Et la seconde est que, tout ce que nous disons du P-N-P peut être également appliqué au N-P-N, en inversant simplement les polarités des sources et, éventuellement, des condensateurs électrolytiques.

IG. — C'est à quoi je me suis employé, en adaptant aux transistors N-P-N les trois montages fondamentaux que nous avons examinés la dernière fois. J'ai fait ces dessins, sur mon lit de souffrances.

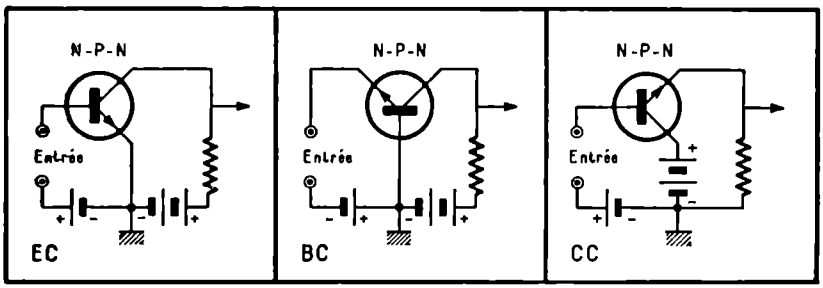
CUR. — N'exagérons rien! A en juger par la correction — que je me plais à reconnaître parfaite — de vos schémas, cette grippe n'a pas gravement affecté votre puissance intellectuelle.

IG. — J'espère que non, car j'ai hâte de passer à l'étude de montages complets d'amplificateurs et de récepteurs. Je pense, d'ailleurs, que tout ce que l'on fait pour les tubes peut être également appliqué aux transistors, compte tenu, bien entendu, des valeurs de leurs résistances d'entrée et de sortie.

Une différence fondamentale.

CUR. — Oui et non, Ignotus. Ne soyez pas surpris par cette réponse de Normand. Evidemment, tous les circuits de liaison, employés dans les

montages à tubes, sont également utilisables pour les transistors. Mais il y a quand même, entre les deux, une différence fondamentale : dans les montages à tubes, chaque étage applique au suivant une *tension* amplifiée. Et, seul, l'étage de sortie, commandé, lui aussi (le plus souvent), par une tension, doit délivrer de la puissance. En revanche, dans un appareil à transistors, chaque étage transmet au suivant une certaine *puissance*, qu'il a amplifiée et que le suivant amplifiera à son tour. C'est vous dire qu'un récepteur à transistors constitue une chaîne d'étages, où la puissance croît progressivement.



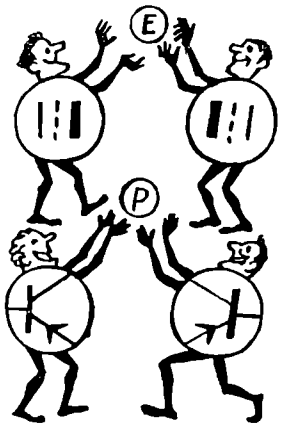
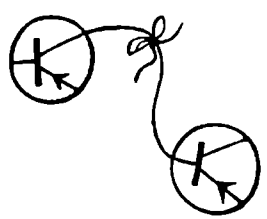


Fig. 86. — Les trois montages fondamentaux réalisés avec des transistors du type N-P-N. Remarquer les polarités des batteries.

Ic. — Je reconnais que cela change bien l'aspect des choses. Dans votre lettre, vous m'avez clairement expliqué que, si l'on cherche à appliquer le maximum de tension à la résistance d'utilisation, on a intérêt à la prendre de valeur élevée. C'est justement ce que l'on s'efforce de faire dans les liaisons entre lampes. Et cela tombe très bien, puisque la résistance d'entrée des lampes est infinie. Mais, avec nos transistors, nous cherchons à transmettre le maximum de puissance. Pour ce faire, il faut avoir une résistance d'utilisation de la même valeur que la résistance de la source. Or, dans les trois montages que nous avons examinés, la résistance de sortie et la résistance d'entrée ont des valeurs bien différentes. D'où, avec ma logique de fer, je conclus qu'il est indispensable d'assurer l'adaptation des impédances à l'aide d'un transformateur. Par conséquent, le seul mode de liaison applicable aux transistors est le transformateur.

Cur. — Oh! impétueuse jeunesse qui cherche l'absolu!... Désolé de vous décevoir, mais, dans le domaine des transistors, la liaison par résistances (et, d'une manière plus générale, par impédances) a également droit de cité. On peut même, vous le verrez, se passer de tout organe de liaison, en reliant directement la sortie d'un étage à l'entrée du suivant.

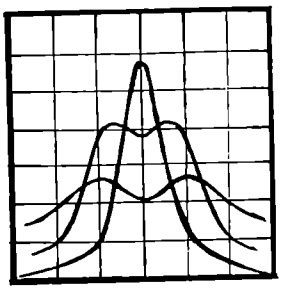


Ic. — Comment? Par un simple bout de fil?

Les qualités et les défauts du transformateur.

Cur. — Mais oui. Procédons cependant par ordre. Et, puisque vous manifestez tant de sympathie pour le transformateur, commençons par lui. Vous avez mentionné une de ses qualités : il permet d'adapter parfaitement l'impédance de sortie d'un étage à celle d'entrée du suivant.

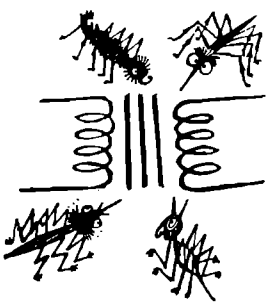
On assure ainsi la transmission optimum de puissance. Mais il est doué d'autres vertus. La faible résistance ohmique de ses enroulements détermine des chutes de tension suffisamment faibles pour qu'on puisse se servir de sources d'alimentation de tension peu élevée. Et, surtout, ne l'oubliez pas, en accordant le primaire ou le secondaire, ou les deux simultanément, on assure la sélectivité voulue dans les étages H.F. et M.F. où, de surcroît, en jouant sur le degré de couplage des deux circuits, on parvient à obtenir la largeur voulue de la bande passante de fréquences.



IG. — Vous voyez bien que le transformateur n'a que des qualités. Et je ne vois pas pourquoi...

CUR. — Il faut donc que je vous montre le revers de la médaille. Tout d'abord, quels que soient les progrès de la miniaturisation, le transformateur occupe un volume supérieur à celui des organes de liaison par résistance et capacité, du moins dans le domaine de la B.F., car en H.F. et en M.F., nulle autre liaison ne lui dispute sa place. Dans la compétition qui se déroule dans le domaine de la B.F., le transformateur se révèle, par ailleurs, plus coûteux que les résistances et les condensateurs de liaison.

IG. — En somme, on le sacrifie pour de mesquines considérations de place et d'argent.

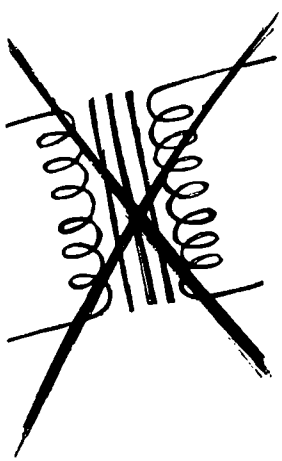


CUR. — Les constructeurs des appareils à transistors ne sont pas des philanthropes, et, comme on leur demande des appareils de plus en plus petits, ils réalisent une double économie, en renonçant au transformateur. Celui-ci présente, d'ailleurs, encore un inconvénient supplémentaire, lorsqu'on l'emploie à l'entrée d'un amplificateur à gain élevé.

IG. — Lequel, mon Dieu?

CUR. — Les inductions de parasites captées par ses enroulements, et qui, une fois amplifiées, risquent d'être une cause de perturbations, ce qui exclut l'emploi des transformateurs là où existent des champs de parasites intenses.

Et voici des schémas pratiques.



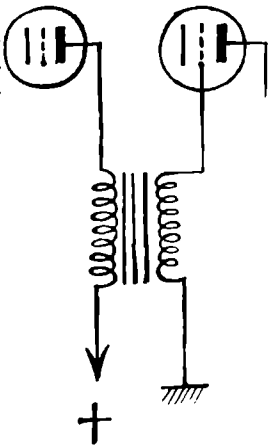
IG. — Voilà donc mon pauvre transformateur accablé de tant de péchés!... Pourrais-je, néanmoins, savoir comment on l'utilise, quand les considérations d'économie et la présence des parasites n'en interdisent pas l'emploi?

CUR. — Le schéma ne diffère pas sensiblement de celui du montage à lampes. Comme vous le voyez, je vous ai représenté, ici, deux transistors montés en E.C. Le transformateur TR 1 sert à attaquer le premier, et TR 2 assure la liaison entre les deux. Ce dernier transformateur aura beaucoup moins de spires au secondaire qu'au primaire. Si la résistance de sortie du premier transistor est de 20 000 Ω, et celle d'entrée du second, de 250 Ω, pour assurer la meilleure adaptation, le rapport de transformation doit être :

$$n = \sqrt{\frac{r_s}{r_e}} = \sqrt{\frac{20\,000}{250}} = \sqrt{80} = 9 \text{ environ.}$$

Nous aurons, dans le secondaire, un courant neuf fois plus intense que dans le primaire.

IG. — Je vois que les tensions de base sont fixées par des diviseurs de tension R_1-R_2 et R_3-R_4, découplés par des condensateurs. Je constate également que vous avez prévu, dans le circuit des émetteurs, des résistances R_5 et R_6, servant à compenser les effets des variations de température. Elles aussi sont découplées par des condensateurs, afin de ne pas exercer une contre-réaction allant au détriment du gain.



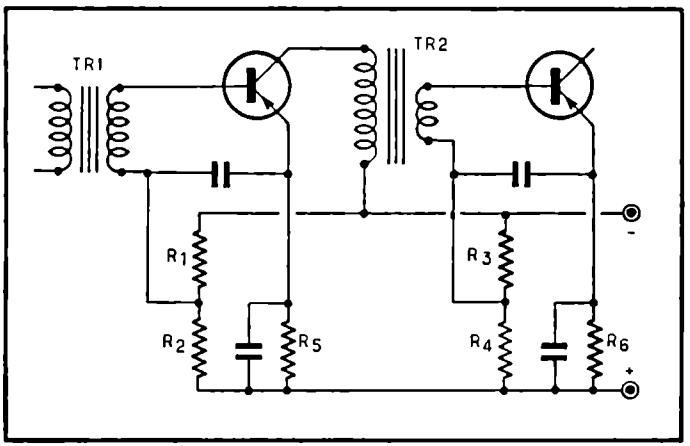


Fig. 87. — Liaison par tranformateur de deux étages montés en EC. — Le premier étage est également attaqué par l'intermédiaire d'un transformateur.

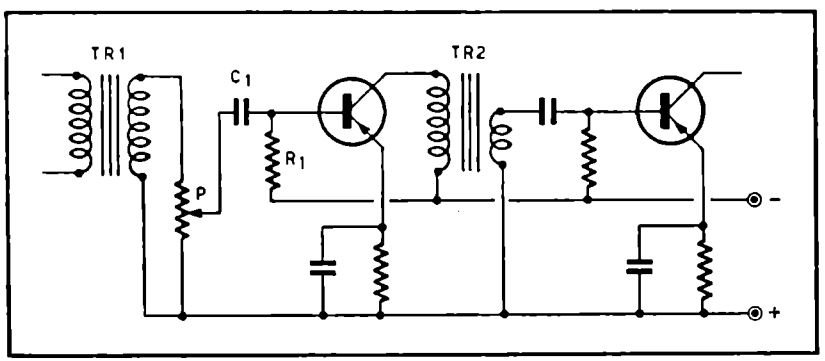


Fig. 88. — Liaison hybride par transformateur et résistance-capacité avec réglage du gain par potentiomètre P.

CUR. — Bravo, Ignotus! Votre grippe n'a en rien altéré votre excellente mémoire.

IG. — En examinant votre montage, je me demande comment vous parvenez à y faire le réglage de l'intensité sonore ou du « volume », comme on a l'habitude de le dire.

CUR. — En fait, il s'agit d'un réglage de gain. On pourrait le faire, en appliquant une contre-réaction, dont le taux serait réglable. Person-

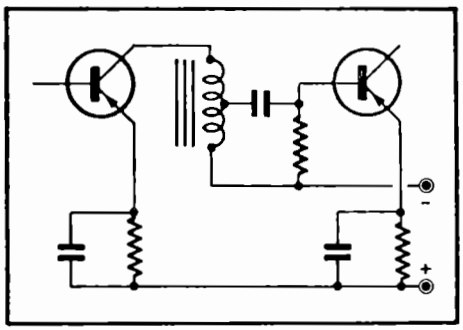
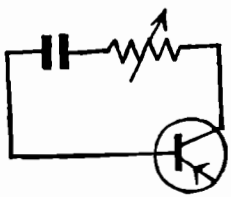


Fig. 89. — Liaison par auto-transformateur.



nellement, je trouve cette méthode détestable. D'abord, elle ne permet pas de réduire le gain à zéro, pour atteindre le silence total. Et, par ailleurs, en même temps qu'on modifie l'intensité du son, on change le taux de distorsion, celui-ci atteignant le maximum, justement, pour la plus grande force de l'audition.

IG. — C'est-à-dire quand les déformations sont le plus difficiles à supporter. Que proposez-vous dès lors?

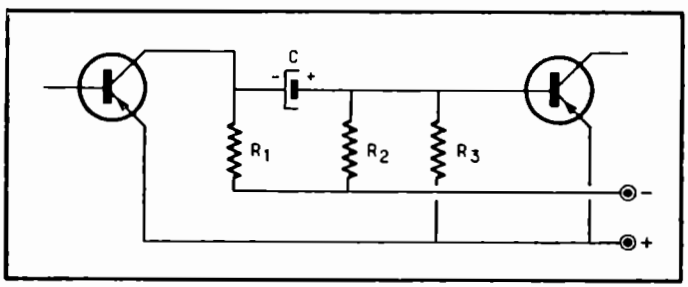
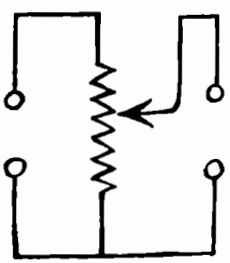


Fig. 90. — Liaison par résistances et capacité.



CUR. — Si le réglage du gain n'est pas prévu à l'entrée de l'amplificateur, pourquoi ne pas faire usage d'un potentiomètre P, pour prélever à volonté une fraction plus ou moins grande de la tension apparaissant au secondaire du premier transformateur? De cette manière, on peut aisément doser l'intensité du son. Le curseur est relié à la base du premier transistor, à travers un condensateur de liaison C_1. Et la polarisation de la base est assurée par la résistance R_1. La même disposition est adoptée pour la liaison entre les deux transistors (fig. 88).

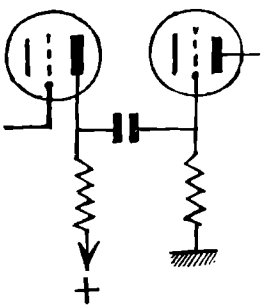
IG. — Votre deuxième schéma m'a l'air d'un centaure : comme cet être mythologique, mi-homme, mi-cheval, votre amplificateur est moitié à transformateurs, moitié à résistances et capacité.

CUR. — Je reconnais que, dans ce montage, nous perdons la simplicité du schéma à transformateur « pur ». Peut-être serez-vous davantage satisfait par celui qui en dérive logiquement : la liaison par autotransformateur. Celui-ci sera généralement un abaisseur, de manière à adapter la résistance élevée de sortie du transistor précédent à celle, plus faible, à l'entrée du suivant, en supposant que les deux soient en E.C.

IG. — C'est toujours mi-chair mi-poisson.

Le montage 100 % R-C.

CUR. — Puisque les montages hybrides vous répugnent, autant passer carrément à l'amplificateur à résistances et capacité, que, dans sa forme la plus pure, représente le schéma que voici (fig. 90).



IG. — Mais, c'est la réplique la plus fidèle du même montage à lampes! La résistance de charge R_1 du collecteur correspond à celle du circuit anodique. Les résistances R_2 et R_3, fixant le potentiel de la base, sont les sœurs mineures de la résistance de grille. Quant au condensateur de liaison... je suis surpris de voir qu'il est du type électrolytique. Ne peut-on donc pas utiliser le bon condensateur au papier de quelque 50 nanofarads ou, si vous préférez, de 0,05 µF, tel qu'on l'emploie dans les amplificateurs à lampes, où il s'acquitte parfaitement de sa tâche?

CUR. — Ce serait désastreux dans notre cas. Quand il s'agit de tubes, il est associé à une résistance de fuite de grille, qui a la classique valeur de 0,5 MΩ. Ici, l'ensemble des résistances R_2 et R_3, en parallèle, a une

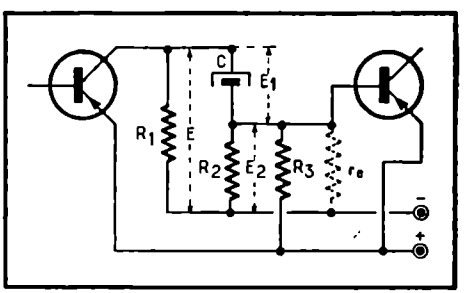
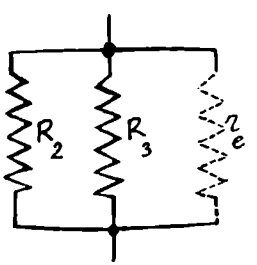


Fig. 91. — Même schéma que celui de la figure précédente, mais présenté de manière à mettre en évidence le diviseur de tension constitué par le condensateur de liaison C et les résistances R_3 et r_e en parallèle.

valeur de l'ordre de 1 000 Ω et est, de surcroît, branché, en dérivation, sur la résistance d'entrée r_e du deuxième transistor. Cette résistance, invisible, mais présente, est du même ordre de grandeur que R_2 avec R_3, disons encore de 1 000 Ω.



IG. — A elles trois, elles forment donc une résistance de 500 Ω. Mais, je ne vois pas en quoi...

CUR. — Patience! Nous pouvons redessiner notre schéma, d'une façon un peu différente, qui montre que le condensateur C, avec les résistances R_2, R_3 et r_e, constitue un véritable diviseur pour la tension E apparaissant sur la résistance de charge R_1. Quelle est donc sa résistance capacitive?

IG. — Elle dépend de la fréquence des courants et diminue quand celle-ci augmente.

CUR. — Evidemment. Eh bien, si vous prenez votre condensateur de 0,05 µF, dont vous êtes si fier, et que vous avez un courant de 50 hertz

(ce terme est préférable aux « périodes par seconde »), la capacité de C est de quelque 65 000 Ω, soit cent trente fois supérieure à la résistance R_2, R_3 et r_e en parallèle.

IG. — Quel désastre! Comme les tensions E_1 et E_2 se répartissent proportionnellement aux valeurs des résistances, E_2 n'est que la cent-trentième partie de la tension E. Nous ne transmettons donc au second transistor que cette infime fraction (1).

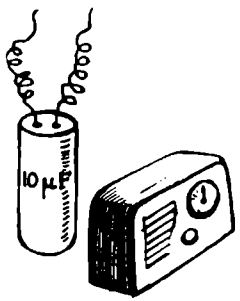
$$Z_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}000035} \cong 65000\ \Omega$$

CUR. — Voilà pourquoi, pour éviter un stupide gaspillage, il faut utiliser un condensateur de forte capacité. Avec un électrolytique de 10 µF, la capacitance, à 50 Hz, ne sera plus que de 325 Ω. Et, plus de la moitié de la tension sera transmise. Pour des fréquences plus élevées, la capacitance C sera encore plus faible, et les choses se présenteront encore mieux. Mais une capacitance insuffisante entraînerait une déplorable atténuation des notes graves.

Prenez garde aux polarités.

IG. — Si je comprends bien, dans les circuits à transistors, où les valeurs des résistances sont généralement bien inférieures à celles que l'on emploie avec des tubes, nous ferons souvent usage de condensateurs électrolytiques. Leur encombrement ne serait-il pas prohibitif?

CUR. — Nullement. Car les modèles destinés à servir sous de faibles tensions (comme c'est le cas avec les transistors) sont d'un volume très réduit et peuvent être aisément logés dans le câblage des récepteurs de poche... En les incorporant dans les circuits, il faut prendre bien garde à respecter les polarités correctes.



IG. — Je constate que vous avez placé le négatif du condensateur du côté du collecteur, celui-ci devant être à un potentiel plus négatif que la base. Je suppose que, s'il s'agissait de transistors du type N-P-N, vous auriez fait le contraire.

CUR. — Et vous ne vous trompez pas. Pour vous montrer quelles sont les polarités des condensateurs électrolytiques, selon leur place dans le montage, je vous donne, ici, le schéma d'un amplificateur pour microphone. Vous voyez que le réglage d'intensité se fait, à l'entrée du premier transistor, à l'aide du potentiomètre P.

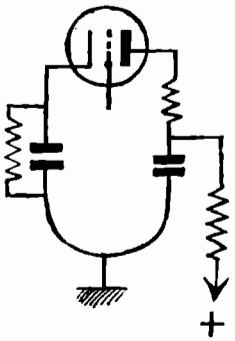
IG. — Et celui-ci attaque la base à travers le condensateur C_1, dont, cette fois-ci, c'est le négatif qui est relié à la base. C'est le contraire de ce que l'on fait pour le condensateur de liaison C_2, qui, relié à un collecteur encore plus négatif que la base, tourne, vers la base, sa face positive... Je constate que les deux transistors sont pourvus de résistances R_3 et R_7 de compensation de température; les condensateurs C_3 et C_4, qui les découplent, ont, bien entendu, leur positif... au positif de l'alimentation. Mais, qu'est-ce que cette résistance R_6, que vous avez placée en série avec la résistance de charge R_4 du premier transistor? Elle est, je le vois, découplée par l'électrolytique C_6, lui aussi ayant son positif au pôle « plus » de la batterie.

---

(1) Une analyse plus poussée, tenant compte notamment de la résistance de sortie du premier transistor, montrerait que la situation est en réalité moins catastrophique. Mais le raisonnement ci-dessus demeure valable en première approximation.

CUR. — N'identifiez-vous pas là une vieille connaissance, souvent employée dans les montages à lampes?

IG. — Nom d'une diode! Mais, c'est notre bon vieux découplage du circuit anodique... pardon, ici, on l'a dans le circuit du collecteur. Sert-il également à éviter des couplages parasites par impédance commune de la source, capables de provoquer des oscillations spontanées?



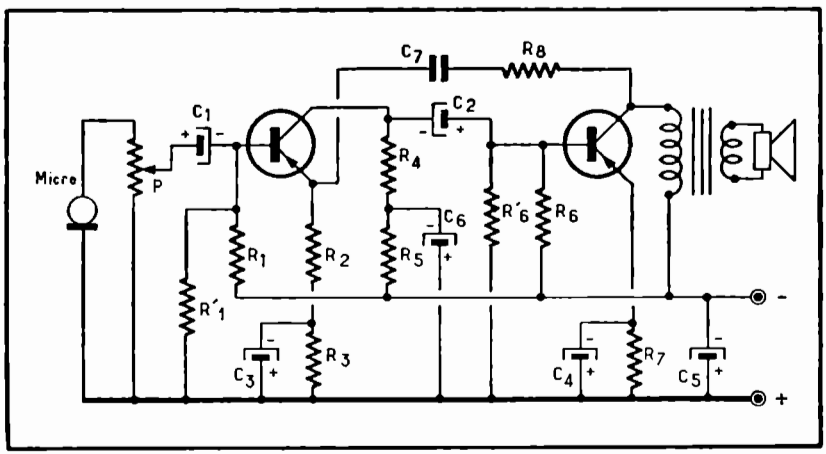
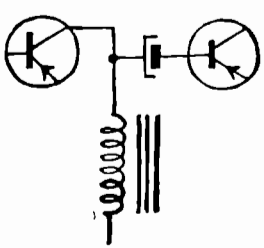


Fig. 92. — Schéma complet d'un amplificateur microphonique. Seul de tous les condensateurs, C_7 utilisé dans le circuit de contre-réaction, ne sera pas du type électrolytique, sa capacité étant de l'ordre de 0,05 µF.

CUR. — Exactement. La résistance interne de la source risque de créer de dangereuses réactions. Aussi, pour offrir aux composantes alternatives des courants, un chemin facile, est-il de bonne politique de brancher, aux bornes de la batterie, un condensateur C_8, de capacité suffisante.

IG. — Dans votre schéma, pour accumuler tous les perfectionnements, vous faites également figurer une contre-réaction mixte, où une partie de la tension de sortie est, à travers R_8 et C_7, appliquée à une résistance R_2, placée dans le circuit de l'émetteur du premier transistor. C'est, en somme, le dispositif que nous avons déjà étudié dans la figure 61.

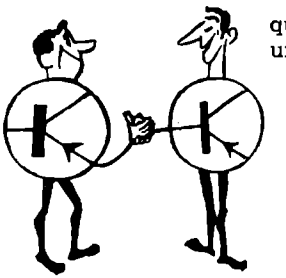


La voie directe.

CUR. — En dépit de l'âge, votre mémoire reste bonne, Ignotus... Aussi, ne vais-je pas davantage m'appesantir sur la liaison à résistances ou, plus généralement, à impédances. Car vous pouvez, aussi bien, utiliser, à la place de la résistance de charge, une inductance plus coûteuse et encombrante, mais de résistance ohmique faible... Et, pour vous récompenser de votre patience, je vais vous présenter un premier schéma

à liaison directe. Vous y voyez un premier transistor, monté en collecteur commun, dont l'émetteur est directement relié à la base du deuxième, qui, lui, est monté en émetteur commun.

Ig. — Je reconnais qu'un tel montage est très économique. Mais je me demande comment on peut, avec tant de désinvolture, supprimer le condensateur de liaison.



Cur. — S'il s'agissait d'un montage à lampes, on n'aurait pu le faire qu'au prix de sérieuses complications, car une anode doit être portée à un potentiel positif élevé, alors que la grille du tube suivant doit, au

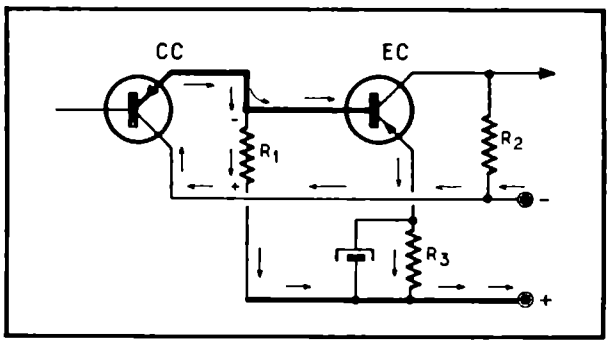
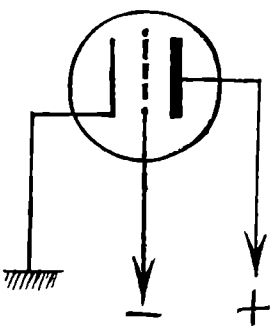
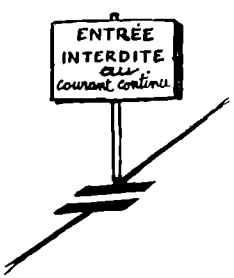


Fig. 93. — Montage à liaison directe. Les flèches indiquent le sens du courant électronique qui entraîne, dans R_1, la chute de tension dont les polarités sont indiquées.



contraire, être polarisée négativement. Mais, avec les transistors, les choses s'arrangent infiniment mieux. Les différences de potentiel sont faibles, et, de surcroît, les potentiels de la base et du collecteur doivent être, par rapport à l'émetteur, du même signe. En revanche, dans un tube, la grille doit être négative, alors que l'anode est positive. Aussi, dans les montages à transistors, parvient-on, sans difficulté, à communiquer à chaque « électrode » le potentiel nécessaire, en produisant des chutes de tension dans des résistances appropriées.

Ig. — Je vais essayer d'analyser votre schéma. A l'aide de flèches, je jalonne le parcours du courant d'alimentation, en partant du pôle négatif de la source. Les électrons entrent dans le premier transistor par le collecteur, en sortent par l'émetteur, et, là, le courant bifurque. Une partie des électrons traverse la résistance de charge R_1, en rendant l'extrémité reliée à la base du deuxième transistor, négative par rapport au pôle positif de la source. Les autres électrons iront, de la base du second transistor, vers son émetteur. C'est tout bonnement le courant moyen de base... Eh oui, vous avez raison : dans le premier transistor, l'émetteur est positif par rapport au collecteur. Et, dans le second, la base est négative par rapport à l'émetteur. Toutes les choses sont en ordre. Et on a économisé un condensateur électrolytique et une résistance.



Cur. — A cela ne se bornent pas les avantages de la liaison directe. Songez qu'un condensateur ne transmet jamais, d'une façon égale, toutes les fréquences. Même avec une capacité de forte valeur, on ne peut pas faire passer de très lentes variations de tension. Ici, en revanche, nous avons réalisé un véritable *amplificateur à courant continu*.

IG. — Voyons, Curiosus! Comment peut-on parler de l'amplification de quelque chose qui est constant?

CUR. — Je reconnais que le terme n'est pas très heureusement choisi. En fait, on appelle ainsi les amplificateurs destinés aux signaux de fréquences très basses, ceux de quelques périodes par seconde ou même ceux dont la période peut durer plusieurs secondes. De plus, on peut avoir affaire à des tensions ou courants non périodiques, variant lentement. C'est, notamment, le cas dans le domaine de la biologie. Les amplificateurs à courant continu sont alors les seuls qu'on puisse employer.

IG. — Je vois un autre usage, où ils seraient précieux : l'amplification des signaux vidéo en télévision, où il est très important de conserver cette composante continue, à laquelle un condensateur de liaison barre le passage.

Premier recours à la symétrie.

CUR. — Imaginez-vous, Ignotus, qu'on y a songé avant vous. Et, pour vous consoler de la déception que vous éprouvez, sans doute, une fois de plus, en constatant qu'on vous vole vos idées... avant qu'elles naissent, je vous présente un autre montage à liaison directe, où les deux transistors sont montés en E.C. Mais on les prend de types opposés : un N-P-N et un P-N-P. Et l'on met à profit leurs propriétés de *symétrie complémentaire*.

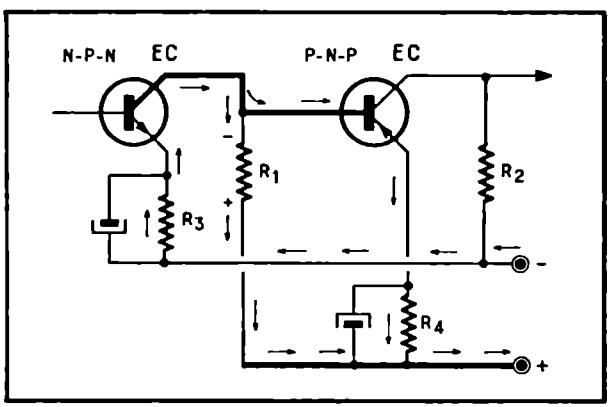
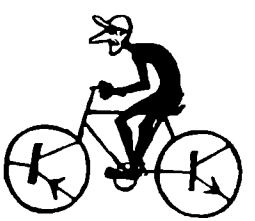


Fig. 94. — Autre possibilité de réaliser une liaison directe grâce à la symétrie complémentaire des transistors de types opposés.



IG. — En suivant, par les flèches, le trajet des électrons, je constate sans peine, qu'ici encore, tout se passe d'une façon parfaite. Le collecteur du premier transistor est rendu positif par rapport à son émetteur,

comme il se doit pour un N-P-N. Tandis que, dans le deuxième transistor, qui est un P-N-P, la base est négative par rapport à l'émetteur. Que souhaiter de plus?... N'y a-t-il pas moyen de supprimer vos résistances de stabilisation R_3 et R_4, avec leurs condensateurs de découplage, pour pousser l'économie encore plus loin?

Cur. — Si la valeur absolue de la composante continue n'a pas à être maintenue constante, vous pouvez omettre ces éléments, mais vous vous priverez du système de compensation de température.

Ig. — Dommage, car je ne vous cache pas la sympathie que m'inspirent ces montages.

Tandems en série.

Cur. — Remarquez, cher ami, qu'il existe d'autres montages à liaison directe, bien plus stables en fonction de la température. Par exemple, le montage *en tandem* des transistors de l'étage préamplificateur et de l'étage final.

Ig. — Que vient faire, ici, cette histoire de bicyclette?

Cur. — On appelle tandems, des paires de transistors alimentés en série. De la sorte, la composante continue des courants traverse succes-

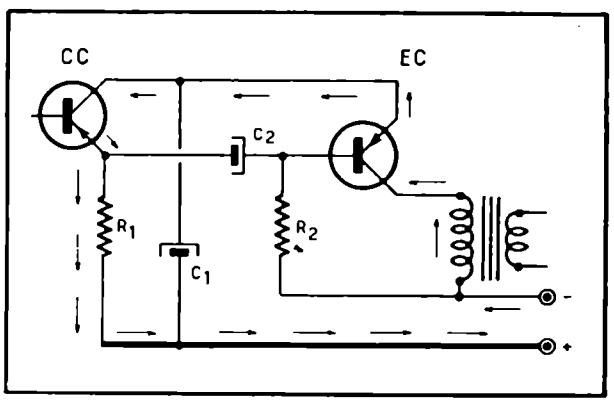
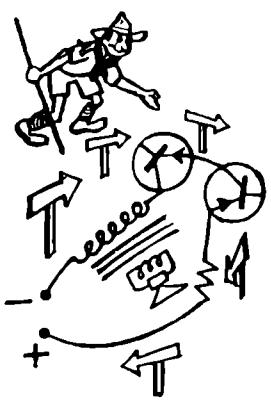


Fig. 95. — Tandem de deux transistors alimentés en série. Les flèches indiquent toujours le sens du courant électronique.



sivement les deux transistors, ce qui détermine une excellente stabilisation. Voici un montage où le premier transistor est monté en collecteur commun, et le second en émetteur commun. Voyez-vous de quelle manière cela fonctionne?

Ig. — Une fois de plus, suivons le guide. Je veux dire les flèches. Cela me reporte au temps où, boy-scout, je participais à ces jeux où il fallait suivre le chemin jalonné par des flèches... Ici encore, partons du négatif de la source. Après avoir traversé le primaire du transformateur de sortie, nos braves électrons entrent dans le deuxième transistor par le collecteur, et le quittent par l'émetteur, pour se précipiter dans le collecteur du premier transistor et en ressortir par l'émetteur. Après ce

brillant exploit, il ne leur reste qu'à traverser la résistance de charge, pour revenir au bercail, je veux dire, au pôle positif de la source.

Cur. — C'est donc, vous le voyez, le même courant qui passe successivement à travers les deux transistors, le collecteur du premier étant directement relié à l'émetteur du second, leur point commun étant découplé par le condensateur C_1, afin d'en écarter des variations de potentiel qu'aurait pu engendrer la composante alternative.

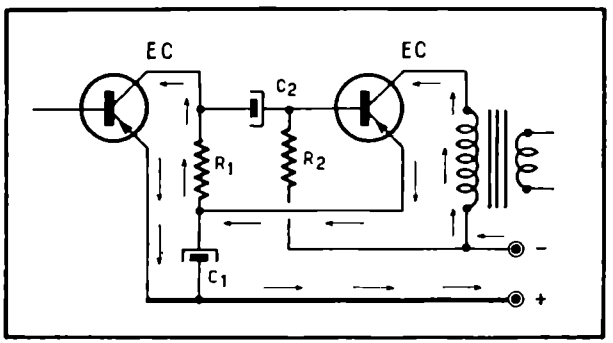


Fig. 96. — Autre tandem composé de deux transistors montés en EC et alimentés en série.

Ig. — Je reconnais que ce schéma ne manque pas d'élégance. Pourrait-on appliquer le même principe à deux transistors montés en E.C.?

Cur. — Bien entendu. Et un tel tandem procure, généralement, un gain supérieur à celui du précédent. Suivez le trajet des flèches. Vous voyez qu'ici encore, c'est le même courant qui traverse successivement les deux transistors. Pour la composante continue, ils sont donc montés en série. En revanche, pour les signaux à amplifier, c'est la plus classique des liaisons par résistances et capacité.

Ig. — Ces astuces de montage m'ont tout l'air d'exercices de haute voltige et me donnent du vertige.

Cur. — En ce cas, je vous laisse vous reposer. Bonne nuit!

En passant en revue les divers modes de liaison entre étages, nos amis ont surtout visé l'amplification à basse fréquence. S'ils en ont étudié les principaux schémas, le problème de l'étage de sortie est, en revanche, resté négligé. Or, lorsqu'il s'agit de débiter une certaine puissance, on a recours à des montages et à des régimes de fonctionnement particuliers qui feront l'objet de la causerie ci-après.

SOMMAIRE : Choix du point de fonctionnement. - Montage économiseur à tension glissante. - Push-pull classe B. - Déphasage par transformateur. - Inverseur de phase. - « Cathodyne » à transistors. - Push-pull à symétrie complémentaire. - Schéma pratique de l'étage de sortie.

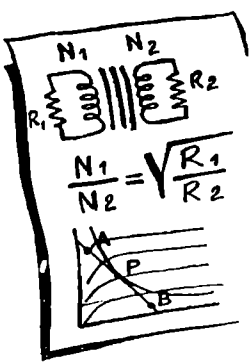
ÉCONOMIE ET PUISSANCE

Ignotus commet le péché d'orgueil.

IGNOTUS. — Avec les connaissances que j'ai acquises dans le domaine de la B.F., je crois pouvoir calculer tous les éléments d'amplificateurs à transistors.

CURIOSUS. — J'ai toujours admiré votre modestie...

IG. — N'ironisez pas. Dans ce domaine, les choses sont simples et claires. S'il s'agit d'une liaison par transformateur, je calcule le rapport assurant la meilleure adaptation. Et, croyez-moi, l'extraction d'une racine carrée ne me fait pas peur... Quant à la liaison par résistances et capacité, ne m'avez-vous pas appris à tracer la droite de charge? Je la placerai de manière que, tangente à l'hyperbole de puissance-limite, elle permette d'avoir la plus grande amplitude des signaux à l'entrée, le point de fonctionnement étant au milieu.



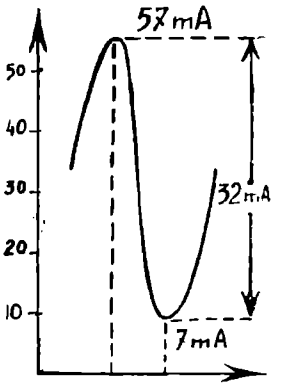
CUR. — Au risque de vous décevoir, je dois vous dire que les choses sont loin d'être aussi simples. Vous avez raison en première approximation. Mais, dans le choix des valeurs, il faut aussi tenir compte de la puissance disponible à l'entrée, de la largeur de la bande de fréquences à transmettre, du rôle de la contre-réaction, du taux de distorsion maximum toléré, que sais-je encore!...

IG. — N'en jetez plus! Je reconnais avoir péché par excès d'orgueil candide. Pourtant, les choses semblent se présenter clairement quand on fait appel au réseau des courbes et à la droite de charge. Notre signal d'entrée (on peut considérer aussi bien la tension que l'intensité du courant de base) a le droit d'occuper la portion de la droite de charge, limitée par deux points : d'une part, A, où les courbes commencent à accuser un coude; d'autre part, B, où le courant de base approche de zéro.

Cur. — Ce qui, vous le savez, est une cause des distorsions non linéaires.

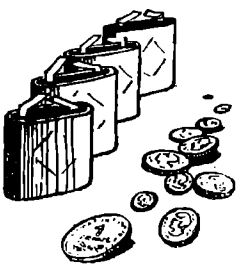
Ig. — Certes. Aussi, doit-on choisir le point de fonctionnement P, à égale distance de A et de B. L'amplitude maximum du signal d'entrée est alors P A ou P B, ou, plus exactement, la différence entre les valeurs correspondantes de I_b ou de E_b. Dans mon dessin, cette amplitude est de l'ordre de 275 mV. Elle fait varier le courant de collecteur entre 7 et 57 mA, avec la valeur moyenne de 32 mA, donc avec une amplitude de 25 mA.

Cur. — C'est parfait, Ignotus. J'espère que vous êtes entièrement satisfait du fonctionnement de votre transistor.



Pas de gaspillage!

Ig. — Pas tout à fait. Autant les choses vont bien lorsque le signal est fort, autant je suis effrayé par le gaspillage d'énergie, en l'absence de modulation ou dans le cas de signaux faibles. Quelle qu'en soit l'amplitude, nous avons toujours la même consommation de courant correspondant au point P. Or, pour des signaux faibles, on aurait pu placer le point de fonctionnement, plus bas, sur une droite de charge correspondant à des courants plus faibles, en P', par exemple. De cette manière, la consommation serait moindre, et nous économiserions des piles qui sont assez coûteuses.



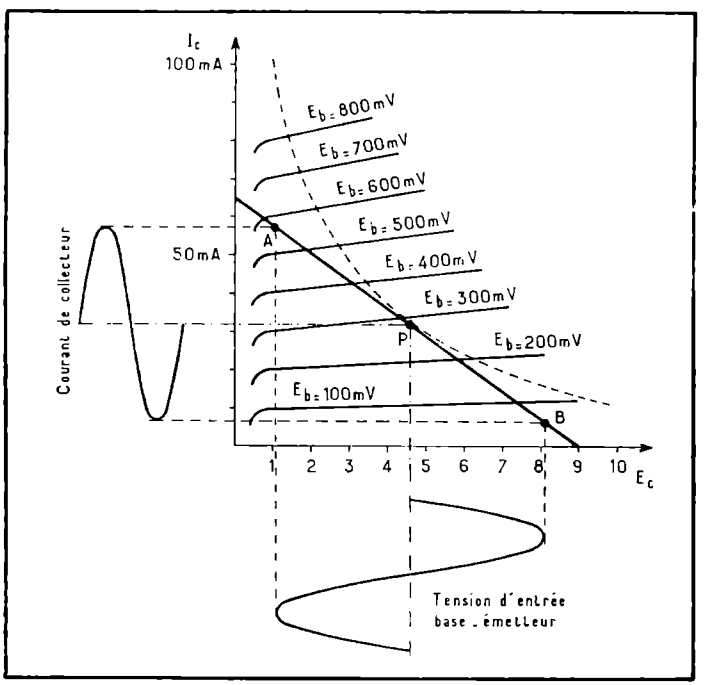
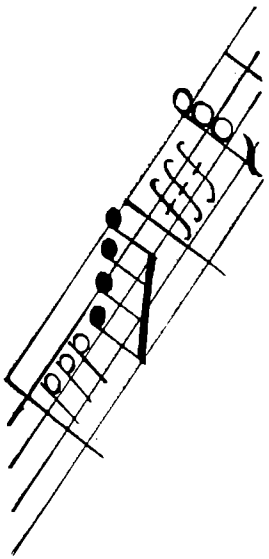


Fig. 97. — On voit, sur ce graphique, comment le courant de collecteur varie sous l'action d'un signal appliqué à l'entrée. Celui-ci a l'amplitude maximum admissible.



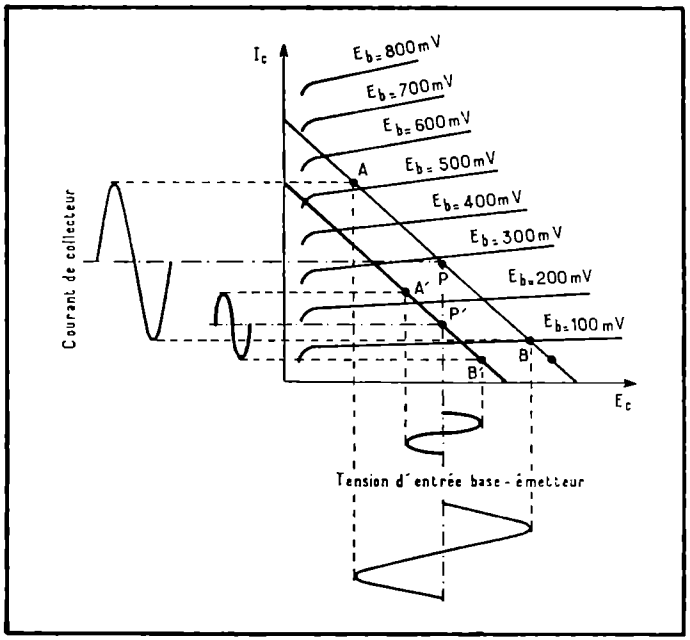
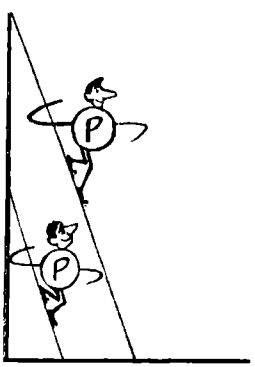


Fig. 98. — Il est plus rationnel de déplacer le point de fonctionnement de P en P', lorsque l'amplitude des signaux diminue.



Cur. — Vous voulez ruiner leurs fabricants?

Ig. — Non. Mais j'estime qu'en écoutant une symphonie, il n'est pas rationnel de dépenser, pendant les *pianissimi*, autant de puissance qu'en exige un grand éclat d'orchestre. Seulement, je ne vois pas par quel moyen on pourrait obliger le point de fonctionnement à se déplacer vers une droite de charge inférieure, de manière à dépenser juste la puissance nécessaire pour reproduire, sans distorsion, les signaux de diverses grandeurs.

Cur. — Ce souci d'éviter le gaspillage est louable. Aussi, vous indiquerais-je volontiers le moyen approprié. Pour que votre point puisse se promener, d'une droite de charge, vers une autre, il faut rendre la polarisation variable (1). Sa valeur doit augmenter avec l'amplitude du signal. Il suffit donc de la commander par ce signal même.

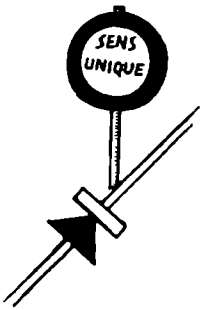
Ig. — Comment? Puisque le signal est alternatif, alors que la polarisation, elle, est continue.

---

(1) Ici, en modifiant la polarisation, nous déplaçons la droite de charge parallèlement à elle-même. Elle garde son inclinaison qui correspond à l'impédance de charge donnée. Celle-ci possède une résistance ohmique négligeable (c'est le primaire du transformateur de sortie), en sorte que la tension moyenne E_c sur le collecteur ne dépend pas de la polarisation. Le point de fonctionnement passe ainsi de P en P' en glissant le long d'une même verticale. La présence d'une résistance ohmique le déplacerait horizontalement.

CUR. — Vous connaissez parfaitement le moyen de transformer un courant alternatif en continu : le redressement. Eh bien, c'est ce que l'on fait pour obtenir la polarisation variable.

Voici un schéma pratique d'économiseur, dont on peut dériver bien des variantes. Vous voyez qu'un enroulement complémentaire sur le transformateur de sortie permet de prélever des signaux amplifiés, qui, à l'aide d'une diode D à semiconducteur, sont redressés, en créant, aux bornes de la résistance R_1, une chute de tension, qui rend le point X plus ou moins négatif. Le condensateur C sert à égaliser la tension obtenue, pour qu'elle ne suive pas les variations rapides du signal, mais corresponde à sa valeur moyenne.



IG. — Oui, c'est le volant régulateur, comme le condensateur qui, avec une résistance, sert à introduire une constante de temps dans le régulateur antifading.

CUR. — Comparaison d'autant meilleure, que notre dispositif rappelle, par plus d'un côté, l'antifading, mais un « antifading » fonctionnant « à l'envers ». Ici aussi, les variations d'amplitude des tensions amplifiées sont, après redressement, utilisées pour commander la polarisation à l'entrée. En effet, les tensions variables du point X sont appliquées au point commun des résistances R_2 et R_3, qui relient la base au pôle

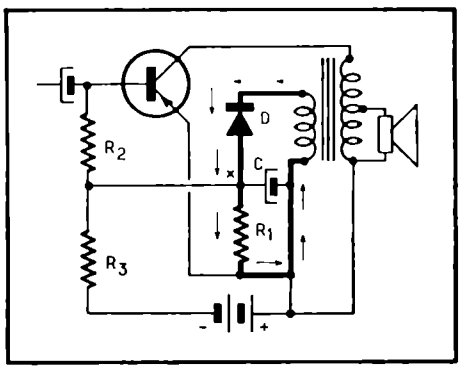
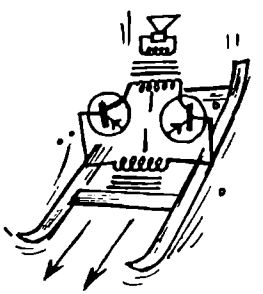


Fig. 99. — Etage de sortie avec circuit économiseur dessiné en trait gras et permettant d'accroître la tension de polarisation quand l'amplitude des signaux augmente.

négatif de la source. Un choix adéquat des valeurs des trois résistances permet de rendre la polarisation proportionnelle à l'amplitude des signaux. De la sorte, la base devient, ici, d'autant plus négative que les signaux sont plus forts.

Vive la classe B!

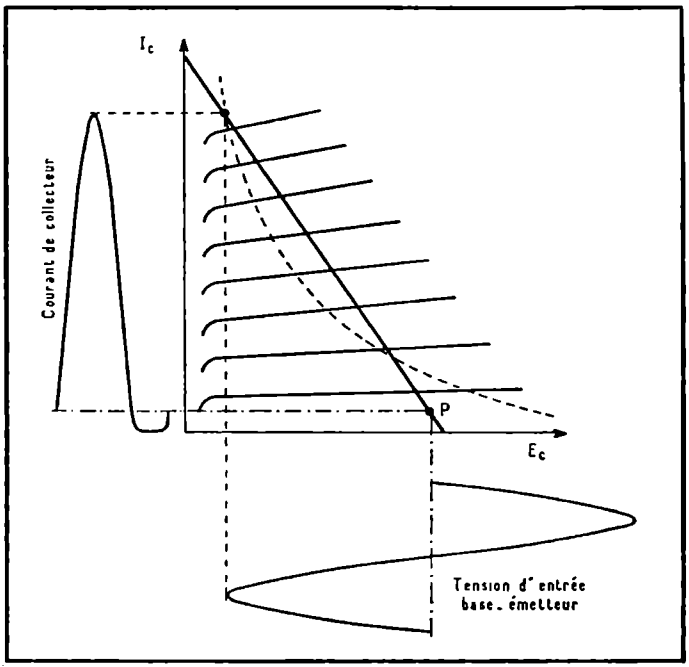


IG. — Votre montage économiseur me plaît beaucoup. Quand je monterai mon récepteur à transistors, il aura, en sortie, un beau push-pull, avec ce dispositif à *tension glissante* de polarisation.

CUR. — Dans un push-pull, mon cher Ignotus, il y a mieux à faire : vous pouvez y appliquer une polarisation fixe, suffisamment faible pour que le courant, au repos, soit presque nul.

IG. — Ne voulez-vous pas parler du régime d'amplification en classe B? Dans les montages à lampes, cela correspond au fonctionnement sur le coude inférieur de la caractéristique du courant anodique en fonction de la tension de grille.

CUR. — Oui, c'est bien de la classe B que je voudrais vous entre-



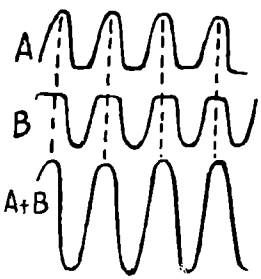
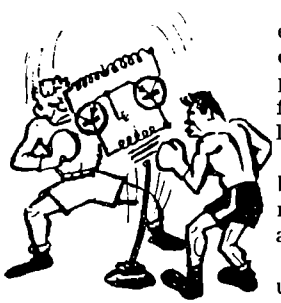


Fig. 100. — Dans le régime en classe B, le point de fonctionnement est relégué près de l'extrémité inférieure de la droite de charge, ce qui permet d'appliquer des signaux d'amplitude deux fois plus grands qu'en classe A. Le courant de sortie est, on le voit, très déformé.

tenir. Vous y placez le point de fonctionnement P à une valeur très faible du courant de collecteur, mais non nulle. Car si vous allez trop loin, les signaux faibles se trouveront dans la partie non linéaire de la caractéristique.

IG. — Je vois qu'ici, les alternances qui accroissent la tension de base, produisent une forte augmentation du courant de collecteur, alors que celles allant dans le sens opposé ne le modifient qu'à peine. La distorsion est horrible!

CUR. — Elle ne permettrait donc pas d'employer un seul transistor en classe B. Mais, si vous en montez deux en push-pull, vous répartissez entre eux, fort équitablement, le travail : l'un se charge des alternances positives, l'autre des alternances négatives. Et la symétrie du montage fait que les déformations introduites par chaque transistor sont neutralisées par celles de l'autre.



IG. — En somme, ce push-pull, classe B, ressemble à un « punching ball », que deux boxeurs utiliseraient, simultanément, pour leur entraînement : placés des deux côtés, ils lui assènent des coups qui le font, alternativement, dévier vers la droite et vers la gauche.

CUR. — C'est tout à fait cela. Et, à eux deux, ils lui imprimeront une amplitude d'oscillation plus forte que ne saurait le faire un seul boxeur.

IG. — En fait, le point de fonctionnement étant situé près d'une extrémité de la droite de charge, nous disposons, pour le signal d'entrée,

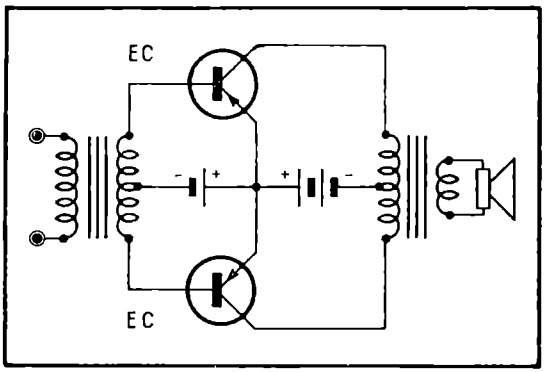
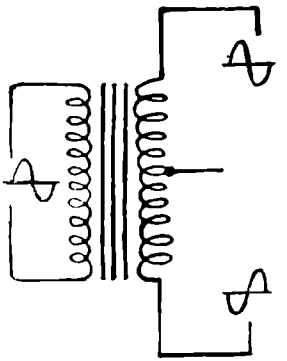


Fig. 101. — Push-pull à déphasage par transformateur. Les transistors sont montés à émetteur commun.



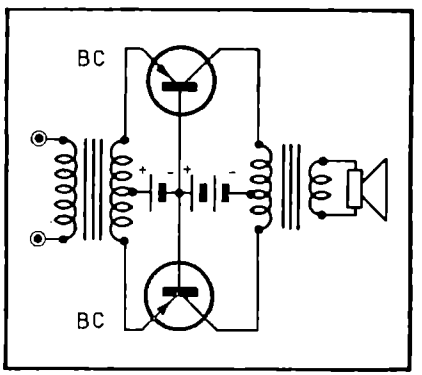
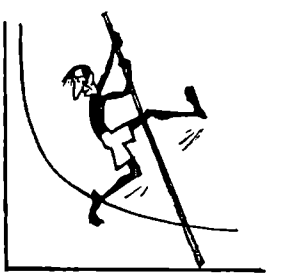


Fig. 102. — Toujours avec déphasage par transformateur, les transistors sont ici à base commune.



d'une étendue deux fois plus grande que dans le cas de la classe A, où le point de fonctionnement est au milieu de la droite de charge.

Cur. — La classe B, vous le voyez, admet des amplitudes doubles de celles de la classe A. La consommation, très faible en l'absence de modulation, croît en proportion de l'amplitude des signaux. Et — je ne vous l'ai pas encore révélé — la classe B permet de franchir hardiment les limites imposées par l'hyperbole de puissance maximum.

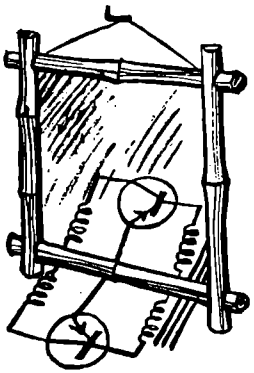
Ig. — Voulez-vous dire que la droite de charge peut passer dans la région située au-delà de cette hyperbole?

Cur. — Mais oui. Et sans danger pour le transistor. Car ce n'est que par instants que la puissance délivrée dépassera cette limite. Au repos et pour des amplitudes moyennes, elle lui sera inférieure. En revanche, il y a une autre caractéristique du transistor, indiquée dans les notices des fabricants, dont il faut, ici, tenir compte : la valeur-limite du courant de collecteur ($I_{c\ max.}$) à ne pas dépasser.

Ig. — Je vous promets de ne jamais transgresser cette valeur. Fort de cette promesse, vous pouvez donc, sans crainte, m'initier à tous les arcanes du push-pull à transistors.

Le règne de la symétrie.

Cur. — Tout d'abord, sachez, Ignotus, que tous les schémas que nous examinerons s'appliquent aussi bien au régime en classe B, qu'au



fonctionnement en classe A. Seule diffère la valeur de la polarisation. Le montage le plus fréquemment employé est celui en émetteur commun, qui procure le maximum de gain. Quand on veut, cependant, réduire les distorsions au minimum, le montage à base commune peut être préféré. Enfin, si la résistance d'entrée doit être élevée et celle de sortie, faible...

IG. — ... on adopte le montage à collecteur commun. Je m'en doutais. Quant au déphasage, je pense qu'on l'obtient aisément, à l'aide d'un transformateur à prise médiane au secondaire. De même, une prise au primaire du transformateur de sortie doit permettre d'appliquer la tension appropriée à la sortie.

CUR. — En effet. Et voici les schémas de deux montages push-pull : le premier, à émetteur commun; et le second, à base commune (fig. 101 et 102). Vous en apprécierez la belle symétrie.

IG. — Doit-on, comme vous l'avez dessiné, utiliser des piles pour la polarisation?

CUR. — Non. Celle-ci est assurée par les méthodes classiques, à l'aide d'une résistance en série ou d'un diviseur de tension, branché sur

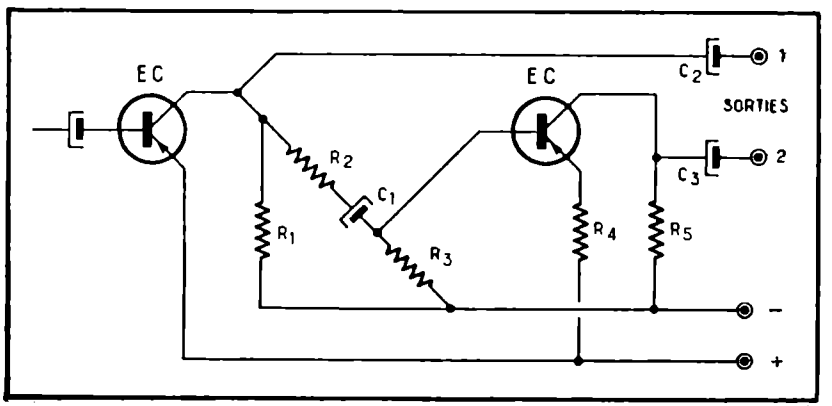
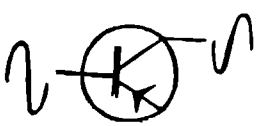


Fig. 103. — Déphasage par transistor monté en émetteur commun avec un gain réduit à 1

la pile unique. Je n'ai pas représenté ces circuits (que vous connaissez, maintenant, fort bien) pour ne pas compromettre la clarté du dessin.

Mille et un déphaseurs.



IG. — Dans les amplificateurs à lampes, on parvient à produire le déphasage des tensions pour le push-pull, en se passant du coûteux et encombrant transformateur. Je pense que c'est également possible avec les transistors.

CUR. — Naturellement. Vous savez que, dans le montage E.C., la tension de sortie est en opposition de phase avec celle d'entrée. On peut donc monter deux étages successifs à E.C. Leurs tensions de sortie seront en opposition de phase.

IG. — Bien bizarre, votre schéma!... La liaison entre les deux transistors n'a pas du tout l'air catholique.

CUR. — Les résistances R_2 et R_3, en série avec le condensateur de liaison C_1, constituent un diviseur de tension, destiné à ne transmettre au second transistor qu'une fraction de la tension que le premier fait apparaître sur sa résistance de charge R_1. De plus, vous constatez la présence d'une résistance de contre-réaction R_4 dans le circuit de l'émetteur du deuxième transistor.

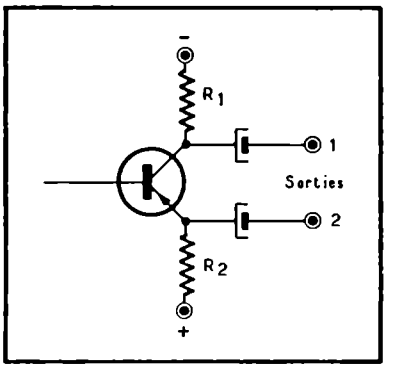


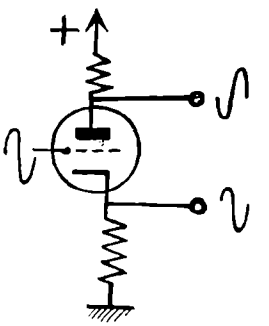
Fig. 104. — Déphaseur constitué par un transistor ayant des résistances de charge tant dans le circuit de l'émetteur que dans celui du collecteur.

IG. — Le pauvre! Vous réduiscz ainsi son gain de deux manières.

CUR. — C'est ce qu'il faut. Car, pour que les deux tensions de sortie soient équilibrées, le gain du deuxième transistor doit être égal à 1. Il ne doit ni amplifier ni atténuer.

IG. — Son rôle est donc strictement d'inverser la phase?

CUR. — C'est, en effet, tout ce qu'on lui demande. Il y a un autre moyen d'obtenir les deux tensions déphasées, à l'aide d'un seul transistor. C'est d'employer un montage mixte E.C.-C.C., en plaçant des résistances de charge R_1 et R_2, aussi bien dans le circuit de collecteur que dans celui de l'émetteur. Le signal, à la sortie 1, sera déphasé par rapport à celui d'entrée, alors qu'à la sortie 2, il sera avec lui en phase.

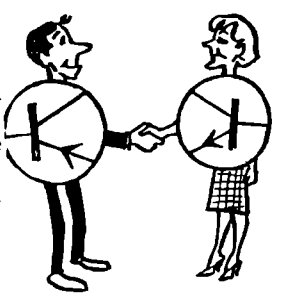


IG. — Mais, c'est la fidèle réplique du déphaseur « cathodyne » à lampes, où des résistances de charge sont intercalées en série avec l'anode et la cathode!

CUR. — Vous l'avez bien reconnu, sous son aspect « transistorisé ».

IG. — Tous ces montages, que vous m'avez présentés, sont, pour moi, de vieilles connaissances, puisque les mêmes déphaseurs existent dans les amplificateurs à tubes électroniques.

Le push-pull miraculeux.

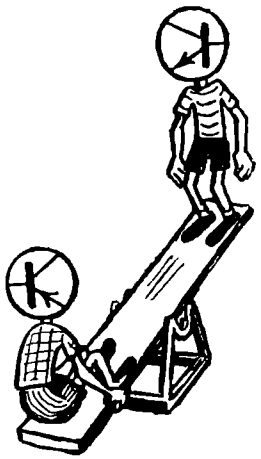


CUR. — Par contre, avec les tubes, vous ne pouvez pas réaliser un push-pull *sans déphaseur*.

IG. — Je ne crois pas, qu'à moins d'un miracle, ce soit davantage possible avec les transistors.

CUR. — Telle est, pourtant, la vérité. Et le miracle, c'est encore la symétrie complémentaire des transistors des types P-N-P et N-P-N. Analysez attentivement ce schéma, où j'en ai monté deux en E.C.

IG. — Procédons par la méthode habituelle... Admettons qu'une première alternance du signal d'entrée rende les deux bases plus négatives.



Dans ce cas, le P-N-P amplifiera le signal. Par contre, le N-P-N restera bloqué. A l'alternance suivante, celle qui rendra les bases plus positives, c'est le P-N-P qui ne bougera pas, et le collecteur N-P-N qui laissera passer un courant de collecteur. Formidable! Astucieux! Ingénieux!

Cur. — Modérez votre enthousiasme, ami. Ce montage nécessite l'emploi de deux piles (ou, du moins, d'une pile à prise médiane), ce qui complique un peu les choses. Encore plus compliquée est l'alimentation du montage fondé sur le même principe de symétrie complémentaire, mais avec des transistors en B.C.

Ig. — En effet. Il doit fonctionner aussi bien que le précédent. Ici, le P-N-P réagit aux alternances positives appliquées à son émetteur, et le N-P-N se déclenche aux alternatives négatives. Mais je crains qu'il ne soit pas aisé d'utiliser ces deux piles pour l'alimentation d'autres transistors pouvant faire partie du montage. D'autre part, je suis intrigué par le fait que les deux moitiés de l'enroulement primaire du transformateur de sortie soient orientées en sens opposés.

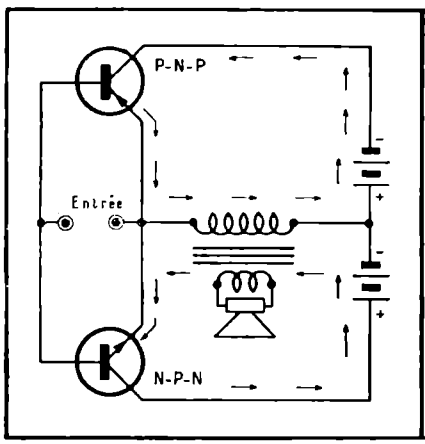


Fig. 105. — Push-pull sans déphaseur équipé de transistors P-N-P et N-P-N montés en EC.

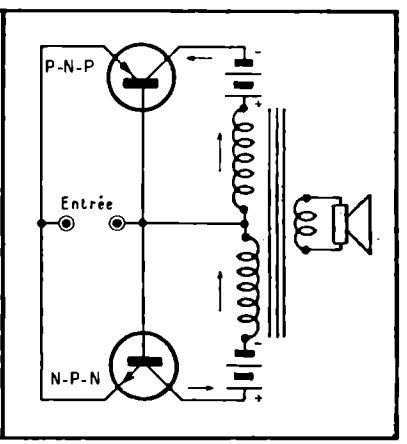
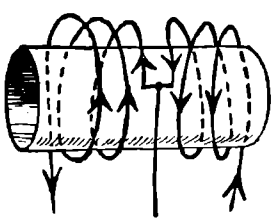


Fig. 106. — Encore un push-pull sans déphaseur, mais avec montage en BC.



Cur. — Ce n'est point une erreur de dessin. En effet, nos deux transistors, de types opposés, font circuler des courants dans le sens que je marque par des flèches. Dans le P-N-P, les électrons *entrent* par le collecteur. Dans le N-P-N, ils en *sortent*. Dès lors, si les deux moitiés de l'enroulement primaire étaient orientées dans le même sens, les courants venant, à tour de rôle, des deux transistors y engendreraient des champs magnétiques de *même sens*. Cela induirait une suite d'alternances de même sens dans le secondaire. Et nous obtiendrions ainsi un doubleur de fréquence.

Ig. — Autrement dit, une belle voix de basse se muerait en une horrible voix de fausset.

Cur. — Pour éviter pareille catastrophe, il a fallu inverser le sens de l'une des moitiés de l'enroulement.

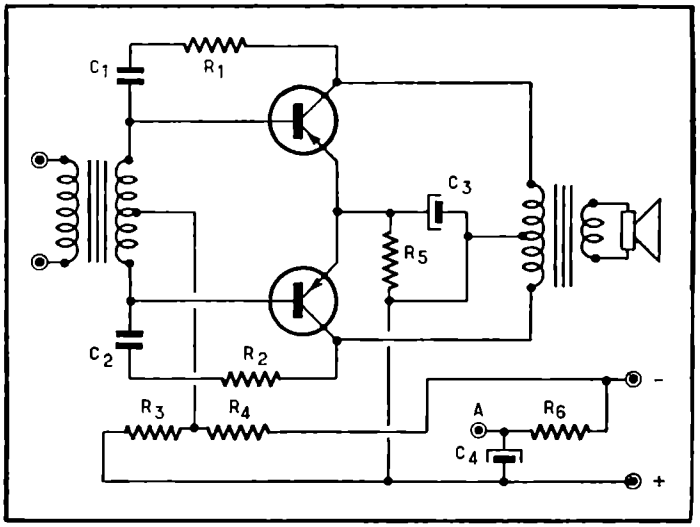


Fig. 107. — Schéma pratique d'un étage push-pull avec contre-réaction, compensation de température et alimentation découplée.

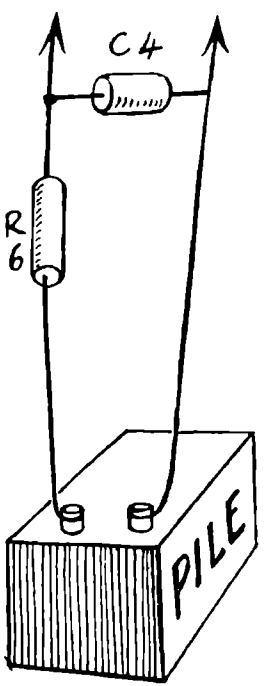
Ig. — Mais alors, dans le montage de la figure 105, on risque le même désagrément.

Cur. — Point du tout. Là, les courants des deux collecteurs parcourent le primaire en sens opposé.

Ig. — Ma foi, vous avez raison... comme toujours. Puis-je, maintenant, vous demander une faveur? Je voudrais bien monter un amplificateur à transistors pour mon électrophone portatif. Pourriez-vous me tracer le schéma pratique de son étage de sortie? Je voudrais avoir un bon push-pull, classe B, assez puissant, pour faire danser notre bande d'amis.

Cur. — Voici le schéma que vous demandez, Ignotus. Vous paraît-il tout à fait clair?

Ig. — Mon Dieu, à première vue, tout y est classique. Déphasage par transformateur... Contre-réaction parallèle sur chaque transistor, par les groupes R_1-C_1 et R_2-C_2 de résistances et condensateurs en série, entre collecteur et base. Polarisation déterminée par le diviseur de tension R_3-R_4... Stabilisation par la résistance R_5, en vue de compenser les effets de température; la résistance est découplée par le condensateur C_3... Tout cela devient, pour moi, de la routine. Cependant, quel est le rôle de la résistance R_6, découplée par le condensateur C_4?



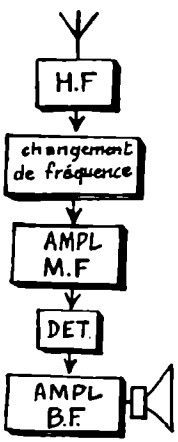
Cur. — Compte tenu des fortes variations du débit de la source que détermine le fonctionnement des transistors de puissance en classe B, il est préférable de découpler cette source, pour éviter des réactions sur d'autres circuits. Tel est le rôle de R_6 et de C_4, qui, au point A, procurent le courant aux étages qui précèdent le push-pull de sortie. Etes-vous satisfait?

Ig. — Oui. Et j'ai hâte de me mettre au travail. Aussi, vais-je vous tirer ma révérence.

L'analyse détaillée de l'amplification à basse fréquence, qui a fait l'objet des deux précédentes causeries, facilitera grandement la tâche de Curiosus. Il va maintenant expliquer à Ignotus les méthodes d'amplification à haute fréquence. Il lui montrera en quoi les montages correspondants ressemblent à ceux utilisant des tubes et en quoi ils en diffèrent. Enfin, il examinera les dispositifs de commande automatique du gain (régulateur antifading) employés dans les amplificateurs M.F. à transistors.

★ **SOMMAIRE : Fréquence de coupure. - Liaison par circuits accordés. - Effet de l'amortissement. - Etages H.F. et M.F. - Capacité collecteur-base. - Neutrodyne. - Régulateur antifading. - Variation des capacités et résistances internes. - Antifading renforcé.**

DANS LE DOMAINE DE LA H.F.



Le doigt dans l'engrenage.

IGNOTUS. — Vous me voyez, Curiosus, fier et ravi à la fois. Fier d'avoir réussi mon premier montage à transistors et ravi d'avoir, dans ma valise tourne-disque, ce minuscule amplificateur qui, avec un appétit plus que modique, procure une audition puissante et pure.

CURIOSUS. — Je suis très heureux de voir avec quel succès vous avez appliqué, en pratique, les connaissances que j'ai pu vous inculquer. Vous voilà donc parfaitement satisfait.

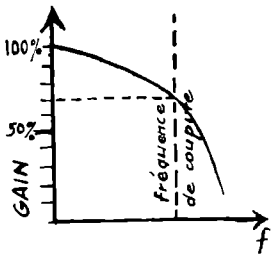
IG. — A vrai dire, pas entièrement. Car j'aurais bien voulu utiliser mon amplificateur, non seulement avec le pick-up, mais aussi comme partie B.F. d'un récepteur de radio. Or, je ne sais pas comment établir les étages précédant la B.F.

CUR. — Et voilà comment, ayant mis le doigt dans l'engrenage, je dois vous entretenir des étages H.F. et M.F., ainsi que, bien entendu, du changement de fréquence et de la détection. Car un récepteur à transistors a sensiblement la même anatomie qu'un poste à lampes. Commençons donc par l'amplification à haute fréquence.

Les transistors en H.F.

IG. — Je sais que c'est le point faible des transistors, puisque leur gain, vous me l'avez dit, baisse avec la fréquence.

CUR. — En effet. Et les fabricants indiquent, dans leurs caractéristiques, la valeur de la *fréquence de coupure*. C'est la fréquence pour laquelle le gain en intensité et la pente tombent à 70 % de la valeur qu'ils ont en basse fréquence. Mais cela n'empêche point d'utiliser ces transistors à des fréquences beaucoup plus élevées, en se résignant à une certaine réduction du gain. La limite de la fréquence utilisable est sans cesse reculée, grâce aux progrès de la technologie. Et, de nos jours, l'amplification des courants de plusieurs centaines de mégahertz, correspondant aux ondes métriques utilisées pour la modulation de fréquence, ne pose plus de problème.



IG. — Où est donc la difficulté? Je pense qu'il ne reste qu'à adopter, pour les transistors, les mêmes montages que pour les tubes.

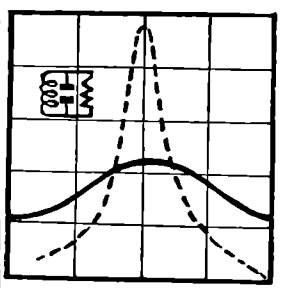
CUR. — On ne pourrait le faire sans tenir compte des valeurs relativement faibles des résistances de sortie et — surtout — d'entrée des transistors.

IG. — En quoi sont-elles, ici, plus gênantes qu'en B.F.? Je suppose qu'il suffit d'utiliser, dans les circuits de liaison, des transformateurs abaisseurs de rapport approprié, pour réaliser l'adaptation des impédances, comme nous l'avons vu faire dans le domaine de la B.F.

Double objectif.

CUR. — Vous oubliez, Ignotus, que l'amplification H.F. a pour objectif, non seulement de renforcer les faibles signaux captés par l'antenne, mais encore d'en opérer le tri, en séparant le bon grain de l'ivraie. Autrement dit, tant en H.F. qu'en M.F., il y a un double impératif : amplification et sélectivité. Les transistors se chargent de l'amplification...

IG. — ... et les circuits accordés, qui établissent les liaisons, assurent la sélectivité.



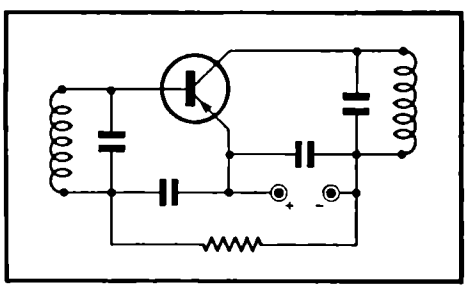


Fig. 108. — Circuits accordés à l'entrée et à la sortie d'un étage H.F. à transistor.

CUR. — C'est bien ce que je voulais dire. Or, prenez un étage où, tant à l'entrée qu'à la sortie, on trouve un circuit accordé. Celui d'entrée est branché entre base et émetteur, donc en dérivation sur la résistance d'entrée, qui mesure entre 200 et 2 000 Ω. Cette résistance l'amortira fortement, en aplatissant sa courbe de résonance. Les choses sont moins désastreuses pour le circuit de sortie connecté, en dérivation sur la résistance collecteur - émetteur, mesurant plusieurs dizaines de kiloohms. Mais, là encore, l'effet de l'amortissement se fera sentir.

IG. — Comment faire, dès lors, pour, tout à la fois, adapter les impédances et éviter l'amortissement excessif. C'est l'histoire de la chèvre et du chou...

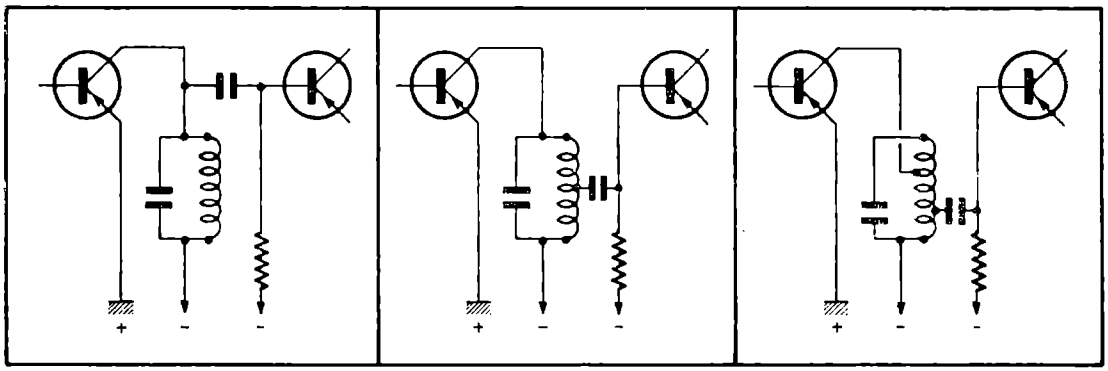
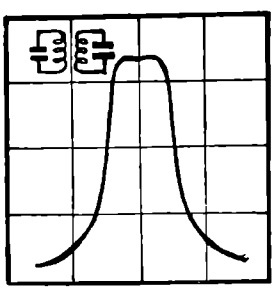


Fig. 109. — A gauche, liaison par « circuit-bouchon ». (Dans ce schéma ainsi que dans ceux qui suivent, le pôle positif de la source est représenté par le symbole de « masse »; cela correspond à la pratique courante dans les montages équipés de transistors P-N-P et où le pôle positif de la pile est connecté à la masse du châssis.)

Fig. 110. — Au centre, liaison par autotransformateur abaisseur à primaire accordé. Ici, les impédances sont mieux adaptées que dans le schéma précédent.

Fig. 111. — A droite, pour réduire l'amortissement dû à la résistance de sortie du transistor, celle-ci n'est branchée que sur une fraction de l'enroulement du circuit accordé.



CUR. — On parvient à les concilier, en jouant, pour chaque circuit accordé, sur le rapport de la self-induction à sa capacité, et en branchant, à l'entrée et à la sortie, non pas la totalité des enroulements, mais seulement une partie des spires, de manière à réduire l'effet de l'amortissement. Et, bien entendu, on s'efforce d'équilibrer les impédances par un rapport approprié des transformateurs.

IG. — Car la liaison doit être toujours établie à l'aide d'un transformateur?

CUR. — Pas obligatoirement. Le plus souvent, on emploie un simple circuit-bouchon. C'est le type même de liaison par impédance et capacité. On peut aussi recourir à l'autotransformateur à primaire accordé et, éventuellement relié, à l'aide d'une prise, à la sortie du transistor précédent.

Le mode de liaison, assurant le maximum de sélectivité et de musicalité, est le transformateur à primaire accordé ou à primaire et secondaire accordés tous les deux. Cette dernière solution est souvent adoptée dans les étages M.F., où de tels transformateurs, grâce au degré approprié de couplage entre leurs enroulements (couplage critique), constituent d'excellents filtres de bande.

IG. — C'est-à-dire qu'ils laissent passer toute la bande des fréquences de modulation, mais atténuent très fortement toutes les fréquences, en dehors de cette bande.

CUR. — Oui, Ignotus. Vous n'avez pas oublié que c'est là le meilleur moyen pour assurer la coexistence pacifique de la sélectivité et de la fidélité musicales.

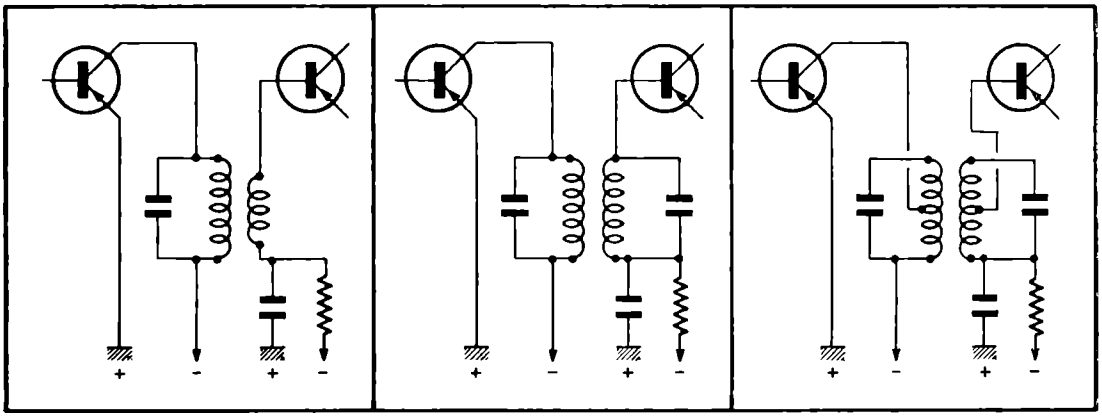
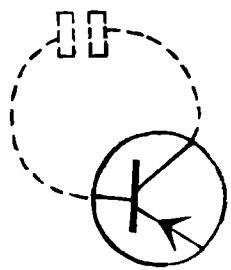


Fig. 112. — A gauche : Liaison par transformateur à primaire accordé.

Fig. 113. — Au centre : Liaison par transformateur à primaire et secondaire.

Fig. 114. — A droite : Même montage que celui de la figure précédente, mais assurant une meilleure sélectivité : grâce aux prises sur les enroulements, la sortie du premier et l'entrée du deuxième transistors amortissent moins les circuits accordés.

L'invisible danger.



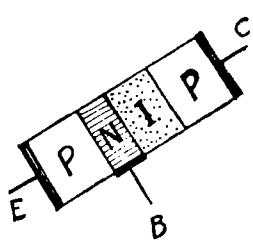
IG. — Je constate donc que, si les fabricants de bobinages font correctement leur travail, je ne dois rencontrer aucune difficulté dans la réalisation de mes étages H.F. et M.F.

CUR. — Désolé de verser une douche froide sur votre béat optimisme. Il y a, en effet, dans le transistor, un danger caché qui vous guette et peut vous valoir bien des déboires.

IG. — Allons, bon! Je préfère combattre à visage découvert. Quelle est donc cette nouvelle embûche?

CUR. — C'est la capacité interne entre collecteur et base. Si vous avez, tant à l'entrée qu'à la sortie, des circuits accordés sur la même fréquence, cette capacité (qui peut être de l'ordre de quelques dizaines de picofarads) suffit pour établir, entre ces circuits, une liaison qui va transformer un paisible transistor en une source d'oscillations H.F.

IG. — Je me souviens que, pour éviter de tels « accrochages », dus à la capacité, entre anode et grille, dans les lampes triodes, on introduit, entre ces deux électrodes, une grille-écran portée à un potentiel fixe. Je suppose que l'on procède de la même façon dans les transistors.



CUR. — C'est, en effet, ainsi que sont constitués les transistors P-N-I-P, dont nous avons déjà parlé. La couche de semiconducteur intrinsèque I joue, dans une certaine mesure, le rôle d'écran réduisant la capacité base - collecteur. Les modèles « drift » comportent également une zone écartant le collecteur de la base. Mais, avec les transistors ordinaires, pour prévenir la naissance d'oscillations sponta-

nées, on a recours à une méthode qui fut, vers 1920, proposée par l'Américain HAZELTINE, pour les montages H.F. à triodes, avant l'invention de la tétrode, qui fut la solution définitive du problème. La méthode consiste à neutraliser l'action de la capacité parasite, en appliquant, à l'électrode de commande, des tensions de même amplitude, mais de phase opposée. Le montage *neutrodyne* avec les triodes employait donc un petit condensateur qui transmettait à la grille une fraction des tensions amplifiées, prélevées en opposition de phase.

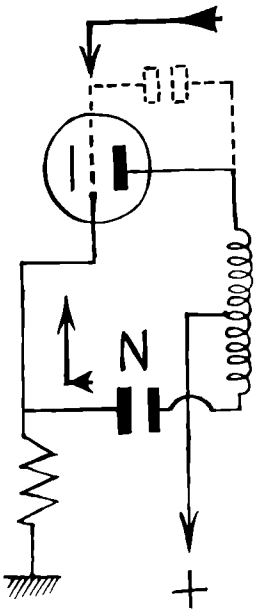


Fig. 115. — Le condensateur N sert à neutrodyner l'action de la capacité interne collecteur-base. Dans certains montages, une résistance est montée en série avec ce condensateur. Son utilité est souvent douteuse.

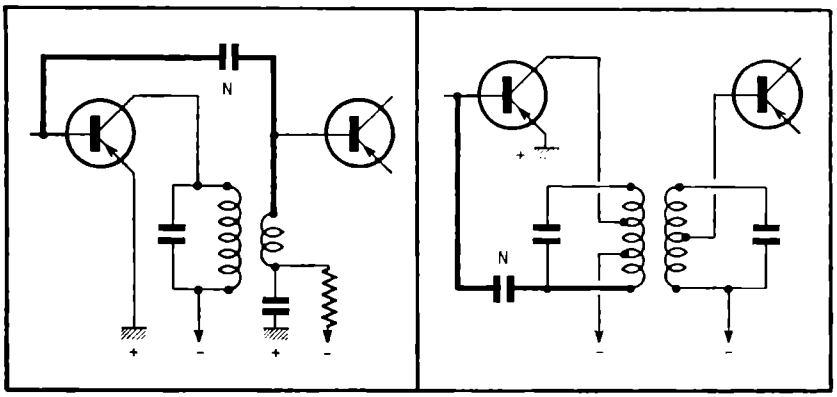
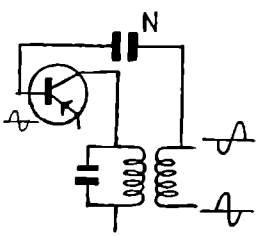


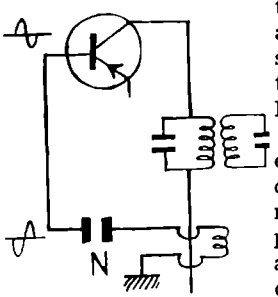
Fig. 116. — Montage neutrodyne préconisé dans le cas de liaison par transformateur à primaire et secondaire accordés.



IG. — C'est, à mon avis, une sorte de contre-réaction, que l'on fait ainsi en H.F. Et, pour les transistors, on doit l'appliquer à la base. Comment faire pour que la condition d'opposition de phase soit respectée? Faut-il recourir à un étage inverseur de phase?

CUR. — Pourquoi chercher de telles complications? Il y a toujours moyen de trouver un point de phase opposée à celle des tensions sur le collecteur. Dans le cas d'un transformateur à secondaire non accordé, l'une des extrémités dudit secondaire constitue le point en question.

IG. — On le relie donc, purement et simplement, à la base, par un condensateur N de valeur telle, que les tensions soient de la même amplitude que celles passant par la capacité collecteur-base. Pourquoi ne pas appliquer ce même procédé dans le cas des transformateurs, dont le secondaire est également accordé? N'y trouve-t-on pas, de même, des tensions en opposition de phase à l'une des extrémités, et en phase à l'autre?

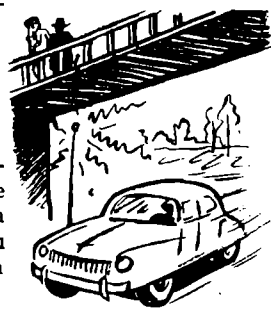


CUR. — Non, hélas! Car là, les tensions sont déphasées seulement d'un quart de période, en avance à un bout et en retard à l'autre. Cela complique un peu les choses. On peut alors, pour avoir la tension de neutralisation, utiliser un petit enroulement auxiliaire. Il est, cependant, plus simple de pratiquer, sur le primaire, une prise pour la connexion allant au négatif de la source. Dès lors, l'extrémité de cet enroulement, qui, par rapport à cette prise, est de l'autre côté de la partie reliée au

collecteur, aura des tensions opposées en phase à celles du collecteur. Il ne vous reste plus qu'à prélever ces tensions et, à travers un condensateur N, les reporter sur la base.

IG. — Est-on toujours obligé de neutrodyner les étages H.F. et M.F.?

CUR. — Non. Souvent, l'amortissement dû aux faibles résistances des transistors suffit pour abolir toute velléité d'accrochages spontanés. Et, avec les P-N-I-P et les « drift », le neutrodynage devient inutile... Par ailleurs, notez, Ignotus, que, si je ne les ai pas fait figurer dans les schémas, afin de les rendre plus clairs, tous les dispositifs de compensation des effets de température (contre-réaction par résistance découplée dans l'émetteur) et de stabilisation de la polarisation de base sont également employés en H.F. et M.F.



Régulation automatique.

IG. — Peut-on, avec les transistors, réaliser la commande automatique du gain (C.A.G.), en fonction de l'intensité des signaux reçus? Je veux parler du régulateur antifading, bien qu'il serve à remédier à toutes les fluctuations du champ à la réception, qu'elles soient dues au fading proprement dit ou au passage, sous un pont métallique, d'un poste installé dans une voiture.

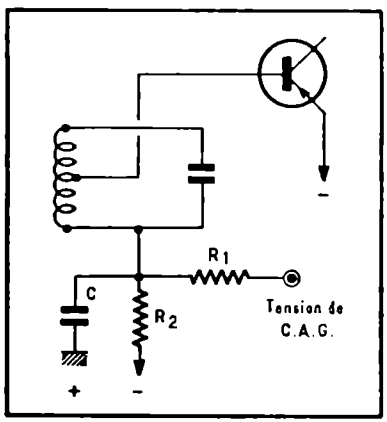
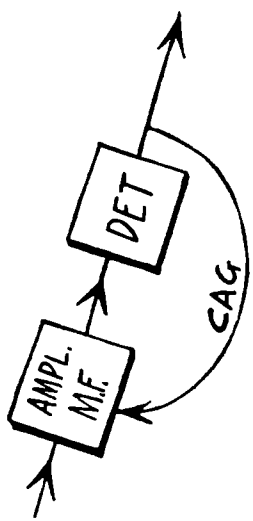


Fig. 117. — Etage amplificateur H.F. ou M.F. soumis à l'action de la tension de commande automatique du gain.

CUR. — La C.A.G. est, dans les montages à transistors, réalisée selon le même principe que dans les récepteurs à tubes. Vous savez que le gain en puissance d'un transistor dépend de sa pente qui, de son côté, varie avec le courant d'émetteur. Par conséquent, en modifiant la polarisation de la base, on peut modifier le gain. S'il s'agit, comme c'est généralement le cas, d'un transistor du type P-N-P, on réduit le courant d'émetteur, donc le gain, en rendant la base moins négative.

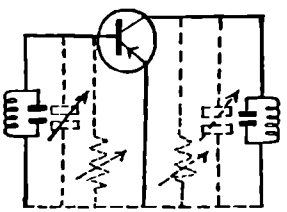
IG. — Et, je le devine, on utilise, à cette fin, une tension prélevée après détection et égalisée par une résistance découplée à l'aide d'une capacité.

CUR. — C'est exact. Cependant, ici encore, il faut ne pas perdre de vue que la commande d'un transistor nécessite plus qu'une tension : de la puissance. Aussi, est-on souvent conduit à prélever la tension de régulation, après avoir amplifié la composante continue du signal détecté. Nous verrons plus tard que cela n'a rien de compliqué.



IG. — En attendant, je vois l'étage H.F. ou M.F., asservi à la C.A.G., sous une forme assez simple. Cette tension, qui doit être d'autant plus positive que le signal est plus fort, est appliquée à la base par l'intermédiaire d'une résistance R_1, et à travers le circuit d'entrée. Une autre résistance R_2, connectée au négatif de la source, constitue, avec R_1, un diviseur de tension. Ainsi, le potentiel moyen de la base va-t-il varier : pour des signaux faibles, il sera plus négatif, ce qui augmentera le gain; il sera moins négatif pour des signaux forts, ce qui donnera un gain plus réduit. Et, ainsi, tout sera pour le mieux dans le meilleur des mondes!

Une difficulté imprévue.



CUR. — Une fois de plus, je me vois forcé de jouer le rôle de rabat-joie : votre optimisme n'est pas tellement justifié. N'oubliez pas que, dans le transistor, tout se tient; et tout changement d'une des grandeurs bouleverse toutes les autres. En l'occurrence, les capacités d'entrée et de sortie varient en même temps et dans le même sens que l'intensité du courant de l'émetteur.

IG. — En sorte que la tension de régulation provoque, par ses changements, le désaccord des circuits oscillants connectés en dérivation sur l'entrée et la sortie du transistor?

CUR. — Mais oui, Ignotus. A cela, ne se limitent cependant pas les dégâts. Car les résistances d'entrée et de sortie changent également en fonction du courant de l'émetteur, mais en sens opposé à ses variations.

IG. — Est-ce grave? Tout au plus, en augmentant, ces résistances amortiront moins les circuits accordés à l'entrée et à la sortie. Et le récepteur deviendra plus sélectif...

CUR. — ... et, de ce fait, moins musical, car la bande passante deviendra plus étroite au détriment des notes aiguës.

IG. — Depuis le temps que je vous connais, Curiosus, j'ai bien compris votre méthode qui consiste à accumuler les pires difficultés pour, ensuite, d'un coup de baguette magique, les faire disparaître. Soyez donc gentil de donner ce coup de baguette.

CUR. — A vrai dire, il faudra vous contenter d'un compromis, car il n'est pas aisé d'éliminer tous les inconvénients que je vous ai signalés. A cette fin, on peut renforcer l'action du régulateur, en agissant en même temps sur l'amortissement d'un circuit accordé, de manière à l'accroître, lorsque les signaux deviennent plus forts. Voici un très ingénieux schéma permettant de le faire. Vous y retrouvez le même procédé de commande du gain, par la tension des signaux détectés, appliquée à la base d'un transistor. Mais, en outre, vous constatez la présence insolite d'une diode entre l'une des extrémités d'un circuit d'entrée et une extrémité de la résistance de charge R_5, dans le circuit de sortie. Essayez d'en analyser le rôle.

IG. — Eh bien, admettons que les signaux reçus deviennent plus forts. La tension appliquée, à travers R_1, à la base du deuxième transistor, devient alors moins négative, et son courant d'émetteur diminue. Le courant de collecteur diminue également. La chute de tension, qu'il détermine dans R_5, devient moins forte, en sorte que le point A devient moins négatif. Dès lors, le courant que laisse passer la diode D devient plus intense, puisque, ainsi, la différence de potentiel qui lui est appliquée devient plus élevée. C'est tout...

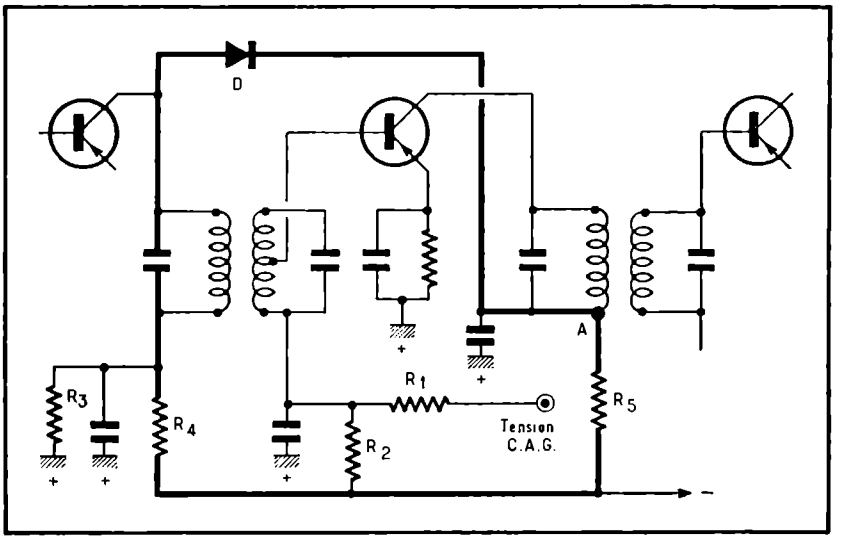


Fig. 118. — Dispositif de C.A.G. renforcée où la diode D détermine un amortissement variable du premier circuit accordé.

CUR. — Non, ce n'est pas tout. Car le circuit, dont fait partie la diode (et que j'ai tracé en gras), est, vous le voyez, connecté en dérivation sur notre premier circuit accordé. Le fait que le courant y devient plus fort signifie que sa résistance est devenue moins élevée. C'est donc qu'il amortit davantage le circuit accordé en consommant davantage de son énergie.

IG. — J'y suis! Ainsi pour les signaux forts, alors que les résistances internes des transistors augmentent, vous avez artificiellement introduit ici une résistance qui, elle, diminue. Et nous compensons ainsi l'une des variations par l'autre. De surcroît, l'amortissement accru du circuit réduit le gain et renforce l'action de la G.A.G.

CUR. — Ignotus, j'ai l'impression que, bientôt, c'est vous qui allez m'apprendre la théorie et la pratique des transistors...

Ignotus sait maintenant comment les transistors permettent d'amplifier les signaux en H.F., en M.F. et en B.F. Mais il ignore la façon de passer d'une de ces fréquences à l'autre. Aussi Curiosus va-t-il lui dévoiler ici les mystères de la détection et du changement de fréquence. Chemin faisant, il passera en revue un certain nombre d'oscillateurs à transistors.

★ **SOMMAIRE : Détection par diode. - Seuil de détection. - Montages pratiques. - Détection par transistor. - Détectrice à réaction. - Montages oscillateurs. - Changement de fréquence avec ou sans oscillateur séparé.**

DE LA H.F. A LA M.F., PUIS A LA B.F.

Les dernières zones blanches.

IGNOTUS. — A une époque où la sélénographie (1) n'a plus de secrets pour nous, je pense irrésistiblement à ces cartes qui, avec leurs zones blanches de « terres inconnues », faisaient les délices de nos grands-pères et laissaient toute latitude à l'imagination de Jules Verne et de ses émules.

CURIOSUS. — Je vois très bien où vous voulez en venir. Dans la chaîne des étages composant un récepteur, il reste, pour vous, deux zones blanches : la détection et le changement de fréquence. Nous allons les combler d'autant plus aisément, qu'aucun piège ne nous guette ici, et que, pratiquement, vous savez comment s'opère la détection à l'aide d'une diode.

IG. — En effet, nous avons déjà, naguère, examiné la façon dont la diode redresse le signal H.F.; après quoi, les alternances unilatérales, égalisées à l'aide d'une capacité, créent une tension B.F. sur une résistance de charge.

Détection = redressement.

CUR. — Voici donc un schéma qui n'a, pour vous, rien de mystérieux. Nous utilisons une diode à pointe D, qui redresse les courants

(1) Géographie (si l'on peut dire) de la lune.

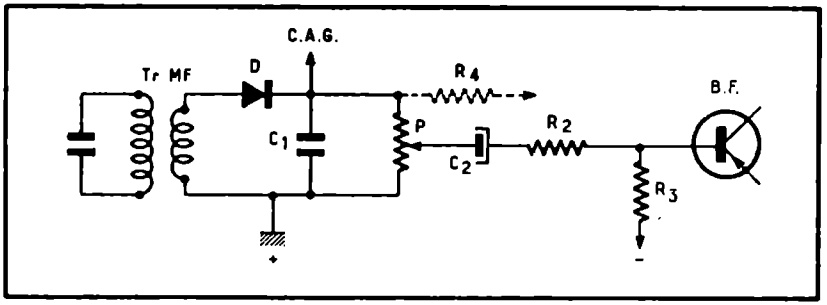
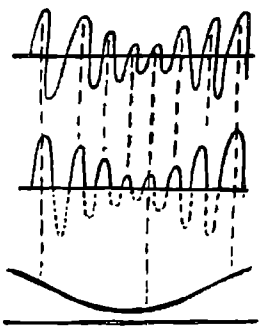


Fig. 119. — Circuit de détection par diode placé entre le dernier transformateur M.F. et le premier transistor B.F.



émanant du dernier transformateur M.F. et crée ainsi, aux extrémités de la résistance P, des tensions que l'action du condensateur C_1 égalise, pour mettre en évidence leur composante B.F. On en prélève une fraction plus ou moins grande, en déplaçant le curseur du potentiomètre P (réglage d'intensité sonore), et, à travers le condensateur électrolytique (nous sommes, ici, en B.F.), on les applique à la base du premier transistor B.F.

IG. — A quoi sert la résistance R_2?

CUR. — A éviter un amortissement excessif du transformateur M.F., causé par la résistance d'entrée insuffisante du transistor B.F. Notez

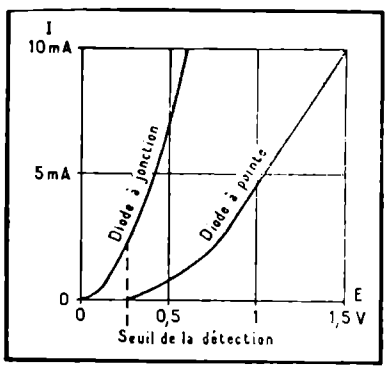
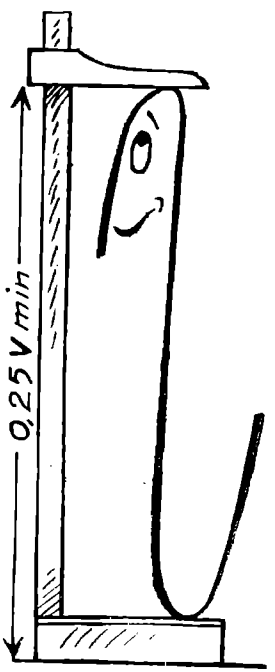
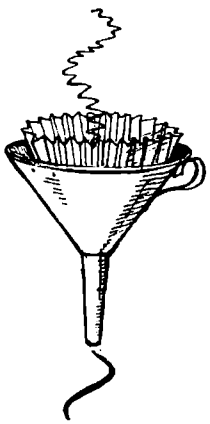


Fig. 120. — Courbes montrant la variation du courant traversant une diode en fonction de la tension qui lui est appliquée. On note que la diode à pointe ne « démarre » qu'à partir d'une tension de l'ordre de 0,25 V.



encore, Ignotus, que la diode à pointe ne commence à laisser passer le courant dans le « bon sens » que lorsque les tensions à redresser dépassent une certaine valeur, qui est le « seuil » de la détection. Aussi, pour pouvoir détecter des signaux inférieurs à ce seuil (qui est de l'ordre de 0,25 V) et ne pas déformer ceux qui, tout en le dépassant, sont faibles, est-il préférable de polariser la diode à la valeur du seuil. C'est la raison d'être de la résistance R_4, qui, de valeur très supérieure à P, forme, avec P, un diviseur de tension, rendant la diode conductrice, même pour des signaux faibles.



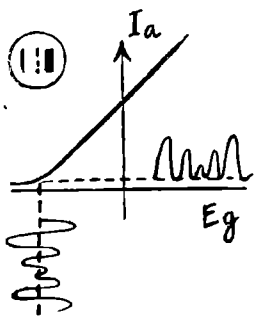
IG. — Je vois que vous prélevez la totalité de la tension détectée pour la C.A.G.

CUR. — Et je ne suis pas sûr que cela suffise toujours pour assurer une régulation suffisante. Toutefois, avant de parler de l'antifading amplifié, je livre à votre pouvoir d'analyse logique un schéma de détection diode plus « raffiné ».

IG. — Il ne me fait pas peur. Comparé au précédent, il en diffère par la cellule de filtrage $C_3 - R_7 - C_4$, véritable petit filtre passe-bas, destiné à éliminer toute trace de la composante M.F., dans la tension apparaissant sur P. D'autre part, vous créez la tension de régulation, sur une résistance de charge distincte R_6, découplée par R_8 et C_6. La polarisation est assurée, grâce à la résistance R_1. En somme, ici, on a mieux séparé le circuit B.F. de celui de la C.A.G. Je voudrais, cependant, savoir comment vous réalisez l'*antifading amplifié*.

CUR. — Tout simplement, en détectant, à l'aide d'un transistor, ou, pour être plus précis, à l'aide de la jonction émetteur-base, qui constitue, en fait, une diode. Son seuil est beaucoup plus faible que celui des diodes à pointe, de sorte qu'une très faible polarisation négative, assurée par le diviseur de tension R_1-R_2, suffit pour permettre la détection des signaux de faible amplitude. Remarquez bien que cette polarisation ne doit pas excéder 0,1 V; sans quoi, au lieu de détecter, le transistor se mettra à amplifier en M.F., ce que nous ne cherchons point... En ne répondant qu'aux alternances qui rendent la base plus négative, le transistor ne laissera passer dans le collecteur que des courants correspondant à ces alternances.

IG. — Mais, c'est tout à fait le fonctionnement de la détection par courbure de la caractéristique anodique dans le domaine des tubes! Je



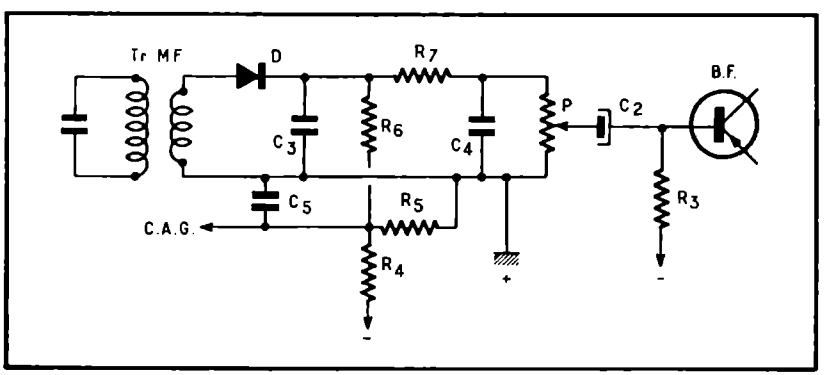


Fig. 121. — Schéma d'un étage détecteur où la tension de régulation est développée sur une résistance de charge distincte et où le courant détecté est filtré par une cellule à résistance et capacités.

vois très bien ce qui se passe dès lors. Nos impulsions unilatérales du courant de collecteur développent, dans la résistance de charge R_3, des tensions de B.F., amplifiées grâce au gain du transistor. Filtrées par $C_1 - R_4 - C_2$, elles sont ensuite dosées par le potentiomètre P, avant de poursuivre leur chemin dans les étages de B.F.

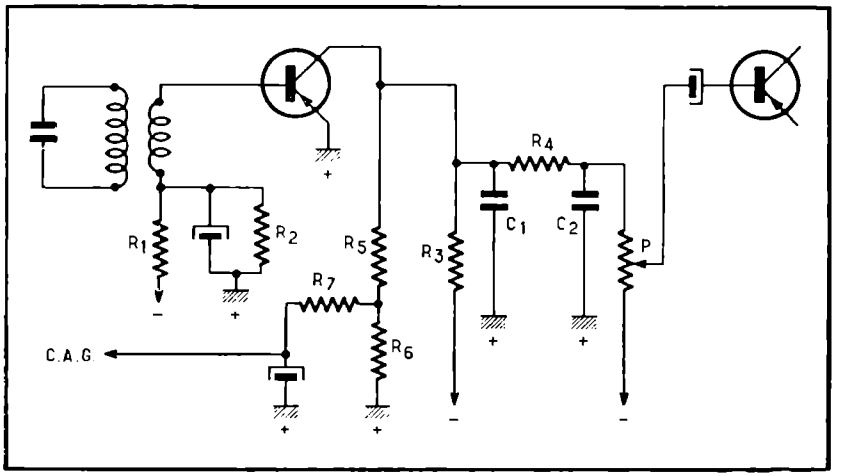
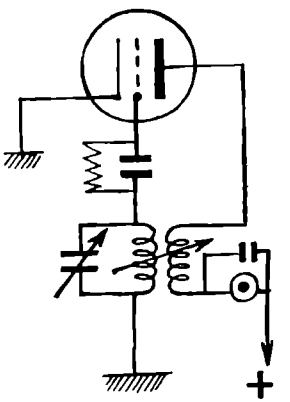


Fig. 122. — Détection par transistor, procurant une tension de C.A.G. amplifiée.

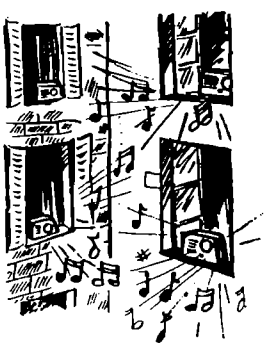


CUR. — C'est exact. Vous constatez, par ailleurs, la présence d'une autre résistance de charge R_6, formant, avec R_5, un diviseur de tension pour, à travers R_7, appliquer une polarisation convenable aux bases des transistors asservis à la C.A.G.

Le contraire de la contre-réaction.

IG. — Et cette tension de régulation, je le vois, est, ici, effectivement amplifiée. Et, puisque nous parlons détection, je voudrais vous demander si, avec les transistors, on peut réaliser une détectrice à réaction, ce montage qui m'a toujours émerveillé par son extraordinaire sensibilité.

CUR. — Bien entendu. Il suffit, à cette fin, de réinjecter, dans le circuit d'entrée, une partie de l'énergie amplifiée, que l'on prélève dans le circuit de sortie. Naturellement, il faut que...

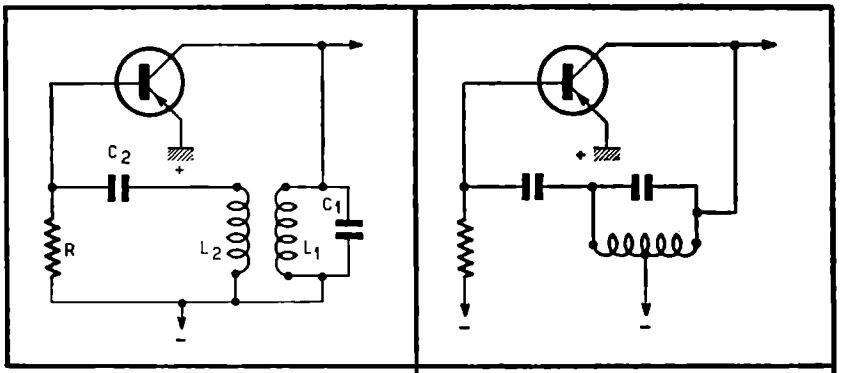


IG. — ... les tensions réinjectées soient en phase avec celles du circuit d'entrée. Sinon, nous ferons de la contre-réaction, et, au lieu d'accroître le gain, nous le réduirons.

CUR. — Une autre condition doit être respectée : le couplage entre les circuits d'entrée et de sortie ne doit pas dépasser une certaine limite; sans quoi...

IG. — ... notre détectrice à réaction se transformera en oscillateur de H.F., et ses émissions intempestives feront naître de faibles sifflements d'interférence dans les récepteurs du voisinage.

CUR. — Cela se produit, quand l'apport d'énergie, dû à la réaction, est supérieur à la fraction d'énergie dissipée dans le circuit d'entrée, en raison des pertes de natures variées. Vous savez, Ignotus, qu'un oscillateur de H.F. n'est pas toujours une raison de discorde avec les voisins.



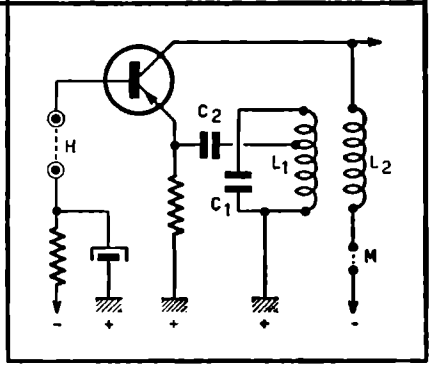
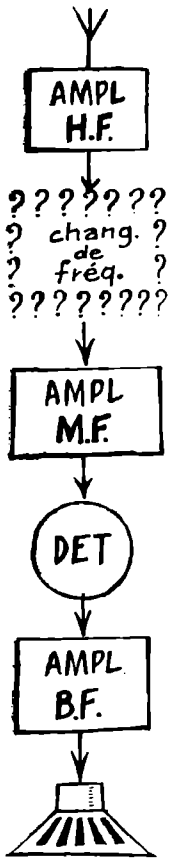


Fig. 123. — Ci-dessus : Oscillateur comportant un circuit accordé dans le collecteur et un enroulement couplé dans la base, servant à la réinjection de l'énergie amplifiée.

Fig. 124. — En haut, à droite : Dans l'oscillateur Hartley, un seul bobinage à prise médiane suffit à l'accord et à la réaction. En remplaçant la prise sur le bobinage par un « point milieu électrique » réalisé à l'aide de deux condensateurs en série, on obtiendrait l'oscillateur Colpitts.



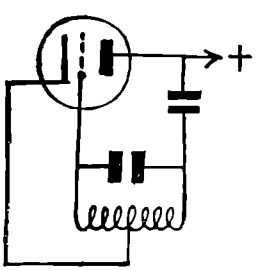


Fig. 125. — Ci-contre, à gauche : Oscillateur du type le plus courant, comportant un circuit accordé dans l'émetteur, couplé par induction à l'enroulement de réaction intercalé dans le circuit du collecteur. La signification des lettres H et M est révélée dans la suite du texte.

Correctement employé, c'est lui qui permet de réaliser le changement de fréquence.

IG. — Ravi de vous voir aborder cette dernière « terra incognita » de ma carte géographique. Je suppose qu'avec la souplesse qui les caractérise, les transistors permettent de réaliser un grand nombre de schémas variés d'oscillateurs.

CUR. — Vous ne vous trompez pas. On peut, en effet, jouer sur plusieurs facteurs : à l'entrée, on peut attaquer, soit la base, soit l'émetteur. On peut, par ailleurs, accorder, soit le circuit de base, soit celui de collecteur. Enfin, on peut réaliser un oscillateur avec un seul bobinage, servant, à la fois, à l'accord et à la réaction.

IG. — Si vous permettez, je vais tenter d'en combiner un bien simple. Je place le circuit accordé dans celui du collecteur, et je couple son enroulement L_1 avec un autre, L_2, attaquant, à travers C_2, la base du transistor, polarisée à l'aide de R. Va-t-il osciller, mon montage?

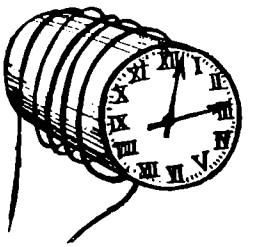
CUR. — Sans aucun doute, si vous orientez convenablement le sens des enroulements.

IG. — Comment savoir *a priori* que cette condition est satisfaite?

CUR. — Pensez toujours au montage Hartley, dont voici la version « transistorisée ». Vous voyez, qu'en allant du collecteur vers la base, le courant parcourt les spires, toujours dans le même sens. Appliquez cette même règle au montage de la figure 123, et, si dans L_1, le courant parcourt les spires dans le sens des aiguilles d'une montre, en allant du collecteur au négatif, veillez à ce que, dans les spires de L_2, le courant tourne de la même façon, en allant du négatif vers la base.

IG. — Mais, si, au lieu de la base, nous attaquons l'émetteur, il faut, sans doute, inverser le sens des enroulements.

CUR. — Bien entendu. Regardez ce schéma, où le circuit accordé $L_1 - C_1$ attaque l'émetteur à travers C_2. Ici, le bobinage de réaction, intercalé dans le circuit du collecteur, doit être orienté dans le sens contraire de l'enroulement L_1, puisque les tensions que l'on applique à l'émetteur sont opposées en phase à celles appliquées à la base.



Triodes à toutes les sauces.

IG. — Il me semble que je serais parfaitement capable de tracer une bonne dizaine de schémas d'oscillateurs. Mais, si vous m'en parlez, c'est, j'en suis sûr, pour aborder le problème du changement de fréquence. Or, je me sens très perplexe. Comment faire un oscillateur-

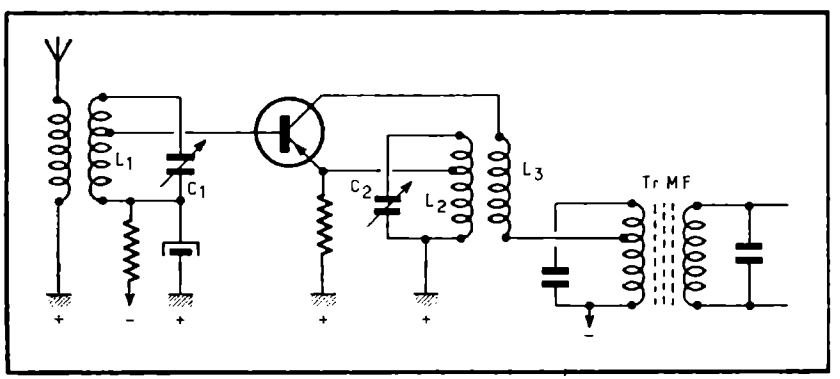
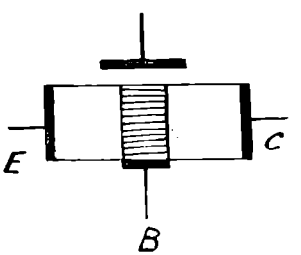


Fig. 126. — Montage changeur de fréquence directement dérivé de l'oscillateur de la figure précédente.

modulateur avec ces transistors, qui ne sont que des triodes à cristal? N'y a-t-il pas moyen de faire des hexodes, des heptodes et des octodes à semiconducteurs?

CUR. — Jusqu'à présent, on ne l'a pas fait. Peut-être pourra-t-on réaliser des semiconducteurs à deux électrodes de commande, en agissant sur le courant, à la fois par le potentiel de la base et par une électrode dont le champ électrique servirait à dévier les porteurs de charge du droit chemin... Mais, en attendant, on peut fort bien se contenter de nos triodes. Les premiers superhétérodynes n'étaient-ils pas réalisés à une époque où l'on ne connaissait que le tube à trois électrodes?



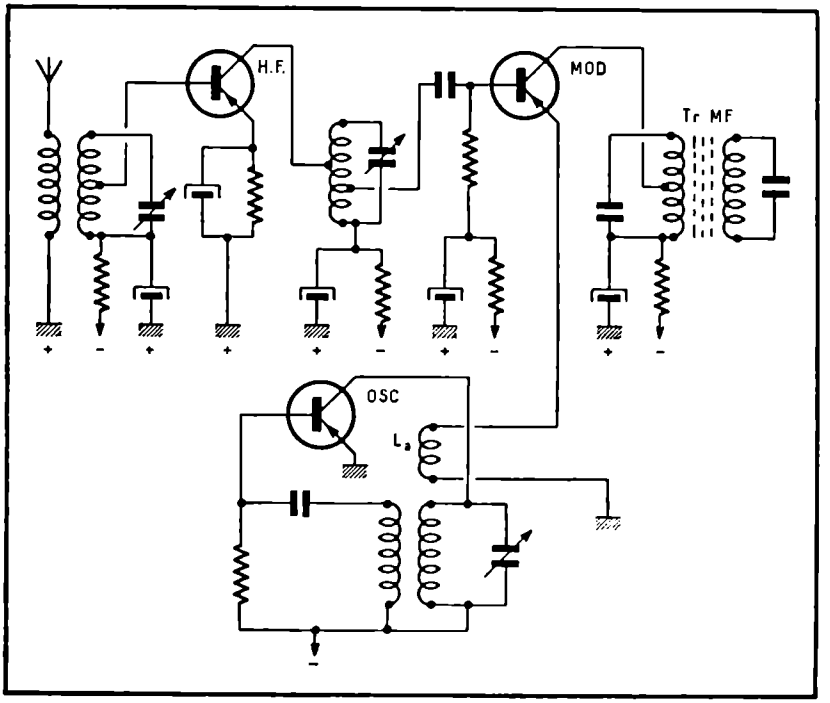


Fig. 127. — Précédé d'un préamplificateur H.F., le modulateur changeur de fréquence comporte un oscillateur séparé.

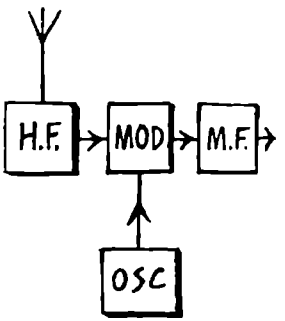
IG. — Comment allez-vous, avec le même transistor, engendrer les oscillations locales, les superposer au courant H.F. d'antenne et détecter le tout, pour faire apparaître la composante M.F., résultant des battements?

CUR. — Très simplement, Ignotus. Prenez l'oscillateur de la figure 125 et intercalez, en H, le circuit accordé sur le signal d'antenne; puis, en M, intercalez le primaire d'un transformateur M.F. Et vous aboutissez au schéma de la figure 126. Si le circuit C_2 - L_2 de l'oscillateur est accordé sur une fréquence différant de celle du signal capté par l'antenne de la valeur M.F., le changement de fréquence s'effectuera sans difficulté.

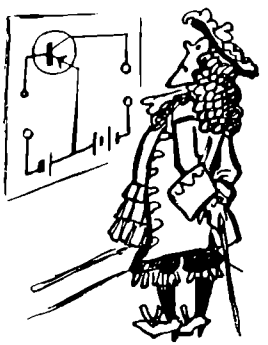
IG. — En effet, vous appliquez le signal à la base, vous créez l'oscillation entre émetteur et collecteur, et vous profitez, assurément, de la non-linéarité de la caractéristique du transistor, convenablement polarisé à cette fin, pour détecter les battements. N'empêche que cette façon d'exploiter un pauvre transistor, en le chargeant de tant de besognes variées, me paraît nous reporter aux pires époques de l'esclavage.

CUR. — Le transistor ne s'en porte pas plus mal pour autant. Mais, si vous tenez à séparer nettement les fonctions d'oscillation et de modulation, — et cela peut être préférable pour la réception des ondes courtes, — vous pouvez recourir à l'emploi d'un oscillateur distinct.

A titre d'exemple, je vous présente le schéma d'un étage préamplificateur H.F., suivi d'un modulateur avec oscillateur séparé. Comme vous le voyez, les oscillations sont appliquées à l'émetteur du modulateur, par l'intermédiaire d'un enroulement L_a, couplé avec les bobinages de l'oscillateur.



IG. — Cela me paraît fort sympathique. Et je constate, avec joie, qu'il ne me reste plus de zones blanches sur la carte du merveilleux pays des transistors.



QUATORZIÈME CAUSERIE

Est-ce parce que, avec la causerie ci-après, va se terminer le voyage que nos jeunes amis ont entrepris au beau pays des transistors, qu'il y sera question des trains?... Cette dernière rencontre permettra à Curiosus et à Ignotus d'appliquer les connaissances acquises à l'étude des schémas d'ensemble. Après avoir ainsi fait usage des notions assimilées dans le passé, nos amis jetteront un regard vers les merveilleuses perspectives d'avenir qui s'ouvrent devant les triodes à cristal.

★ **SOMMAIRE : Schéma de récepteur complet. - Cadre sur ferrite. - Applications variées des transistors. - Convertisseur de courant continu. - L'avenir des transistors.**

DES WAGONS ET DES TRAINS

Amusement des grands, tranquillité des enfants.

IGNOTUS. — Ne soyez point surpris, Curiosus, de me voir jouer avec un train électrique. Celui-ci est destiné à mon petit cousin. Et, je suis en train de vérifier le bon fonctionnement de la télécommande et des aiguillages.

CURIOSUS — Oui. C'est ce que les pères disent en offrant un train électrique à leurs fils, puisqu'ils n'osent pas avouer combien cela les

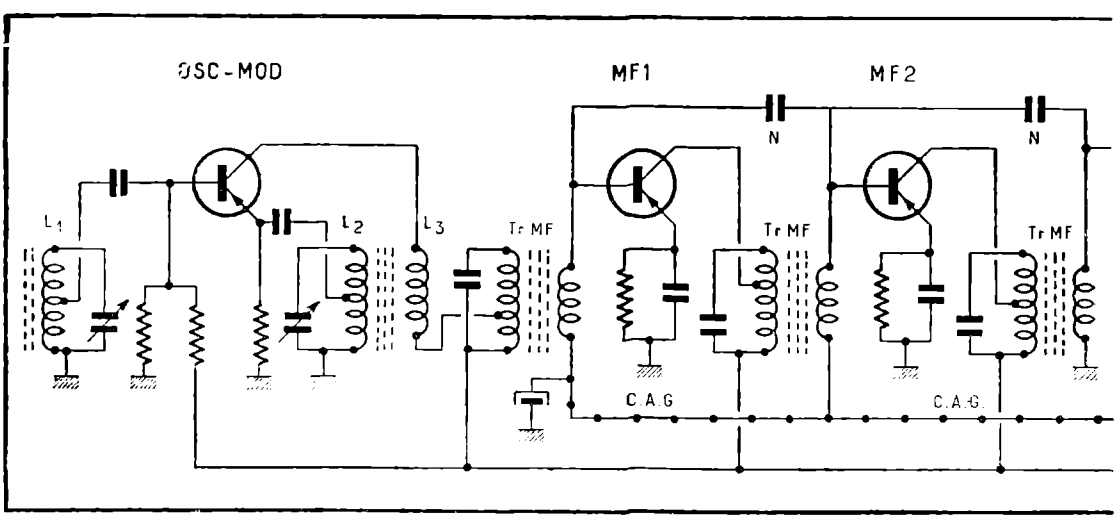


Fig. 128. — Schéma-type d'un récepteur portatif à transistors composé d'éléments précédemment étudiés.

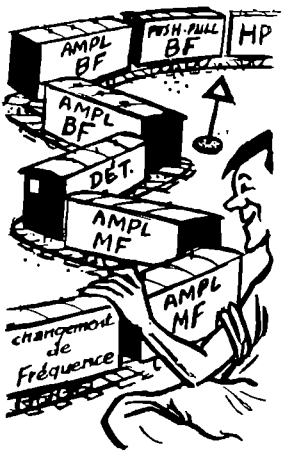
amuse eux-mêmes... Mais vous gâtez votre neveu. Quelle variété de wagons! Voyageurs de toutes les classes, sleeping, wagon-restaurant, wagons frigorifiques, citernes, plates-formes, que sais-je?...

IG. — Cela permet de combiner, à l'infini, la composition des convois.

CUR. — Au même titre que les divers montages à transistors, que nous avons étudiés, permettent de composer une infinité de récepteurs de toute sorte. Il serait vain de vouloir les passer tous en revue. Mais, si vous voulez, à titre d'exemple, nous bâtirons un schéma composé de wagons... je veux dire des montages suivants :

— Changeur de fréquence de la figure 126;
— Deux étages amplificateurs M.F. de la figure 115 (mais avec prises sur les primaires, pour réduire l'amortissement);
— Détecteur de la figure 119;
— Deux étages B.F. à résistances et capacités de la figure 90;
— Un étage final push-pull de la figure 101.

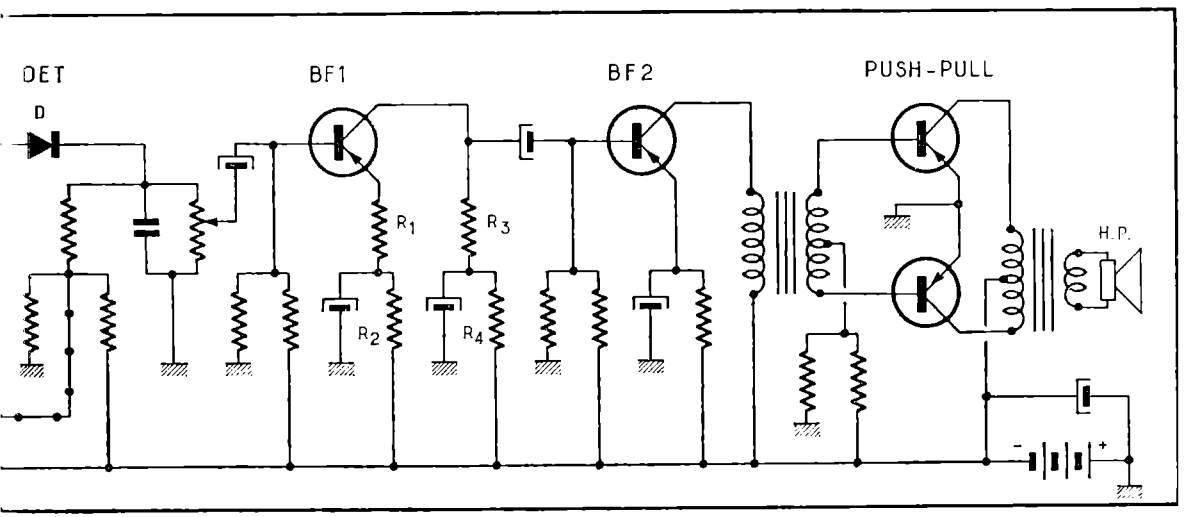
Je vous demande d'examiner attentivement ce schéma, qui est, à des points de détail près, celui de la plupart de ces récepteurs portatifs qui ont troublé vos heures estivales sur la plage. Y voyez-vous quelque chose qui vous intrigue?



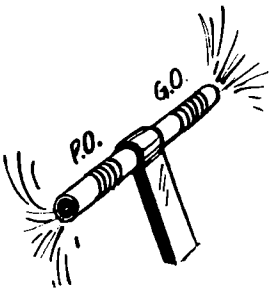
Le cadre miniature.

IG. — Ce qui m'intrigue, c'est ce que je n'y vois précisément pas : l'antenne.

CUR. — Le récepteur n'en comporte pas. Le bobinage d'entrée L_1 est enroulé sur un long bâtonnet de ferrite, et capte ainsi les ondes, en assurant les fonctions de cadre.

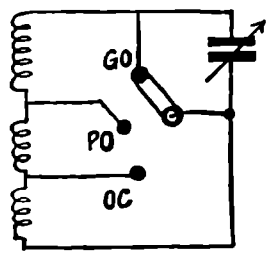


Aucune valeur des éléments n'est donnée, ces valeurs dépendant des modèles des transistors utilisés.



IG. — Le diamètre d'un tel enroulement ne doit-il pas être grand pour lui assurer un pouvoir collecteur suffisant?

CUR. — Non, car le ferrite est une céramique magnétique de haute perméabilité. C'est dire qu'il aspire, en quelque sorte, tous les champs magnétiques se trouvant dans son voisinage. Et, ainsi, le petit bobinage, dont le diamètre n'excède guère deux centimètres, peut avoir le même pouvoir collecteur qu'un grand cadre à air. Il en a également le pouvoir directif, ce qui oblige à orienter convenablement les récepteurs portatifs et accroît leur sélectivité, tout en atténuant les parasites émanant des autres directions. Notez, Ignotus, qu'en fait, à la place de l'unique enroulement L_a (de même, qu'au lieu des enroulements d'oscillateur L_2 et L_3), on trouve normalement plusieurs enroulements mis en circuit par un commutateur et correspondant, chacun, à une gamme d'ondes. Ainsi, on en a deux sur les récepteurs servant à recevoir les ondes longues et moyennes. Et, si l'on doit également recevoir les ondes courtes, il s'y ajoute un troisième bobinage, relié, lui, à une petite antenne, car la réception des O.C. sur cadre est malaisée. Voyez-vous d'autres points vous paraissant obscurs?



Tout est clair.

IG. — Ma foi, non. Je constate que la polarisation de toutes les bases est fixée, à l'aide de diviseurs de tension.

CUR. — On a même intérêt à rendre ceux-ci réglables, en employant, à cette fin, dans chaque paire de résistances, une ajustable. Le choix correct du point de fonctionnement est extrêmement important.

IG. — Je suppose que, de la sorte, les deux transistors de puissance, formant le push-pull final, sont polarisés de manière à fonctionner en classe B, ce qui économisera la consommation de la batterie.

CUR. — Pour contrôler vos connaissances, puis-je vous demander quel est le rôle des résistances R_1, R_2, R_3 et R_4?

IG. — R_1, qui n'est pas découplée, est une résistance de contre-réaction série. Elle réduit le taux des distorsions. Et, de plus, son action s'ajoute à celle de R_2, qui sert à stabiliser l'étage en compensant l'action des changements de température. Quant à R_3, c'est la classique résistance de charge. Enfin, R_4, avec son condensateur, sert à découpler le circuit de collecteur, pour éviter des couplages parasites.

Longue vie au transistor!

CUR. — Bravo! Ignotus. J'ai l'agréable impression de ne pas avoir perdu mon temps en vous exposant le fonctionnement des transistors et leurs applications dans les amplificateurs et récepteurs de radio.

IG. — Car, bien entendu, à cela ne se bornent pas les usages des « bêtes à trois pattes »?

CUR. — Vous pensez bien, cher ami, avec quel enthousiasme tous les électroniciens se sont emparé de ces merveilleuses triodes à cristal, dont l'encombrement et le poids sont infimes, l'appétit plus que modique (comparé à celui des tubes, qui, eux, nécessitent un courant de chauffage), et dont la longévité est remarquable. Dix ans après la création du premier transistor, des gens très sérieux affirmaient déjà que les triodes

à cristal pouvaient fonctionner durant au moins cent mille heures. Le plus cocasse de l'histoire est que les dix années en question ne comptaient que quatre-vingt-sept mille six cent quarante-huit heures en tout! Et je tiens compte des années bissextiles... Il semble, pourtant, que l'extrapolation, à laquelle on s'est ainsi livré, encore que hardie, se révèle exacte et peut-être même au-dessous de la vérité.

Ig. — Je sais que les machines à calculer font une grande consommation de transistors. Certaines en contiennent une dizaine de mille.

Cur. — Vous comprenez quel avantage offrent, en ce cas, leur faible encombrement et, pratiquement, l'absence de tout dégagement de chaleur.

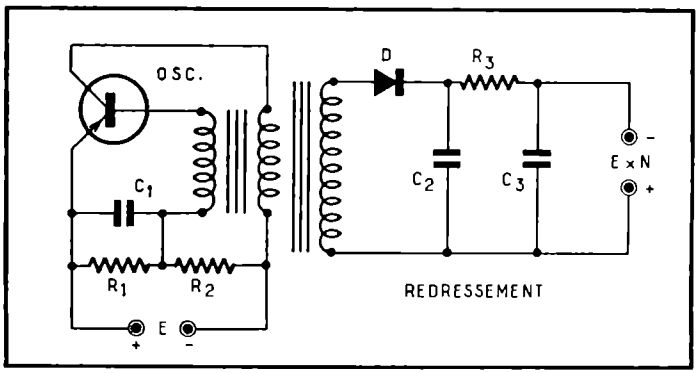
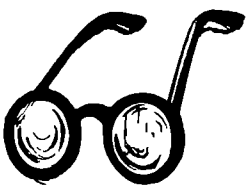


Fig. 129. — Convertisseur de courant continu permettant d'élever N fois la tension E de la source. Le diivseur de tension R_1-R_2 sert à polariser convenablement la base.

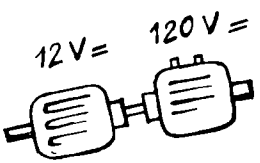


Ig. — Ce même faible volume a permis, je l'ai lu, de réaliser des appareils de prothèse auditive, c'est-à-dire des amplificateurs pour « durs d'oreille », qui sont contenus dans des branches de lunettes, ce qui les rend parfaitement invisibles.

Cur. — C'est exact. Vous devinez combien les qualités des transistors sont appréciées dans les engins spaciaux, où chaque gramme, chaque centimètre cube, chaque milliwatt des sources d'alimentation, compte énormément.

Ig. — En somme, dans tous les domaines, le transistor est capable de remplacer avantageusement les tubes à vide.

Cur. — C'est trop vite dit. Jusqu'à nouvel ordre, il reste des applications où les tubes sont irremplaçables, comme, par exemple, les émetteurs de puissance. Mais, en revanche, il y a des problèmes que seul le transistor permet de résoudre. C'est vous dire que tubes à vide et semiconducteurs peuvent mener une coexistence pacifique, chacun étant employé à bon escient.



Nous aurons, sans doute, une autre occasion de parler des emplois du transistor, comme commutateur, comme multivibrateur, comme bascule, toutes sortes de wagons que vous ne connaissez pas encore et qui sont employés pour composer divers trains électroniques, avec lesquels nous pourrions nous amuser. En attendant, je ne vous en montrerai qu'un petit exemple : le convertisseur de courant continu, qui, avec les transistors, est bien plus simple à réaliser qu'avec des tubes.

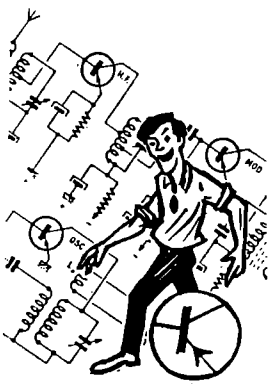
Un convertisseur silencieux.

IG. — Qu'appelez-vous convertisseur de courant continu?

CUR. — Un dispositif permettant d'élever la tension d'une source de courant. Naguère, pour ce faire, il fallait utiliser un moteur à courant continu, qui, alimenté, par exemple, à partir d'une batterie de douze volts, faisait tourner une génératrice de courant continu, procurant, disons, cent vingt volts.

IG. — Quelle complication et, assurément, quel faible rendement!

CUR. — Aussi, peut-on, à l'aide d'un transistor, assurer l'opération sans bruit, sans mouvement, et avec un meilleur rendement. A cet effet, on transforme le courant continu de la source de tension E en courant alternatif. On le fait, à l'aide d'un transistor monté en oscillateur B.F. bloqué. Je vous rappelle qu'on appelle ainsi les oscillateurs à enroulements fortement couplés, et qui donnent des oscillations qui sont loin d'être sinusoïdales, ce qui, en l'occurrence, importe peu.



IG. — Je devine la suite. Un troisième enroulement, placé sur le même noyau et comportant beaucoup plus de spires, permet d'élever la tension du courant alternatif. Il ne reste, dès lors, qu'à le redresser, à l'aide de la diode, et le filtrer, à l'aide de la résistance R_3, associée aux condensateurs C_2 et C_3, pour obtenir une tension continue élevée N fois.

CUR. — Une fois de plus, Ignotus, vous faites preuve d'une remarquable pénétration d'esprit, dont je vous félicite.

Je crois que vous avez bien assimilé mes enseignements et que vous n'aurez pas de mal à vous guider dans le dédale des schémas à transistors. Dites-vous bien, cependant, que la technique des semiconducteurs est encore en pleine évolution, qu'elle est en train de conquérir de nouveaux domaines (dont celui de la télévision), que les progrès de la technologie nous réservent, sans doute, bien des surprises. Aussi, dois-je vous donner un bon conseil : ne vous laissez pas dépasser par ces progrès. Suivez-les attentivement, lisez les études publiées dans la presse technique. Ayez toujours présente à l'esprit cette pensée de Francis BACON : « Celui qui ne se renouvelle pas, se détruit, car la marche inexorable du temps transforme toute chose ». N'hésitez pas, enfin, à mettre vos connaissances en pratique, en expérimentant vous-même des montages à transistors. Vous serez alors mieux conscient, du fait que...

IG. — ... Le transistor?... Mais, c'est très simple!

FIN